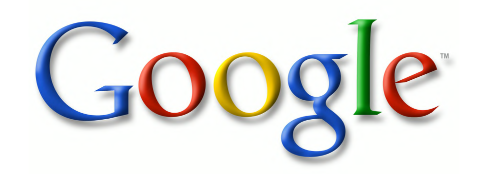
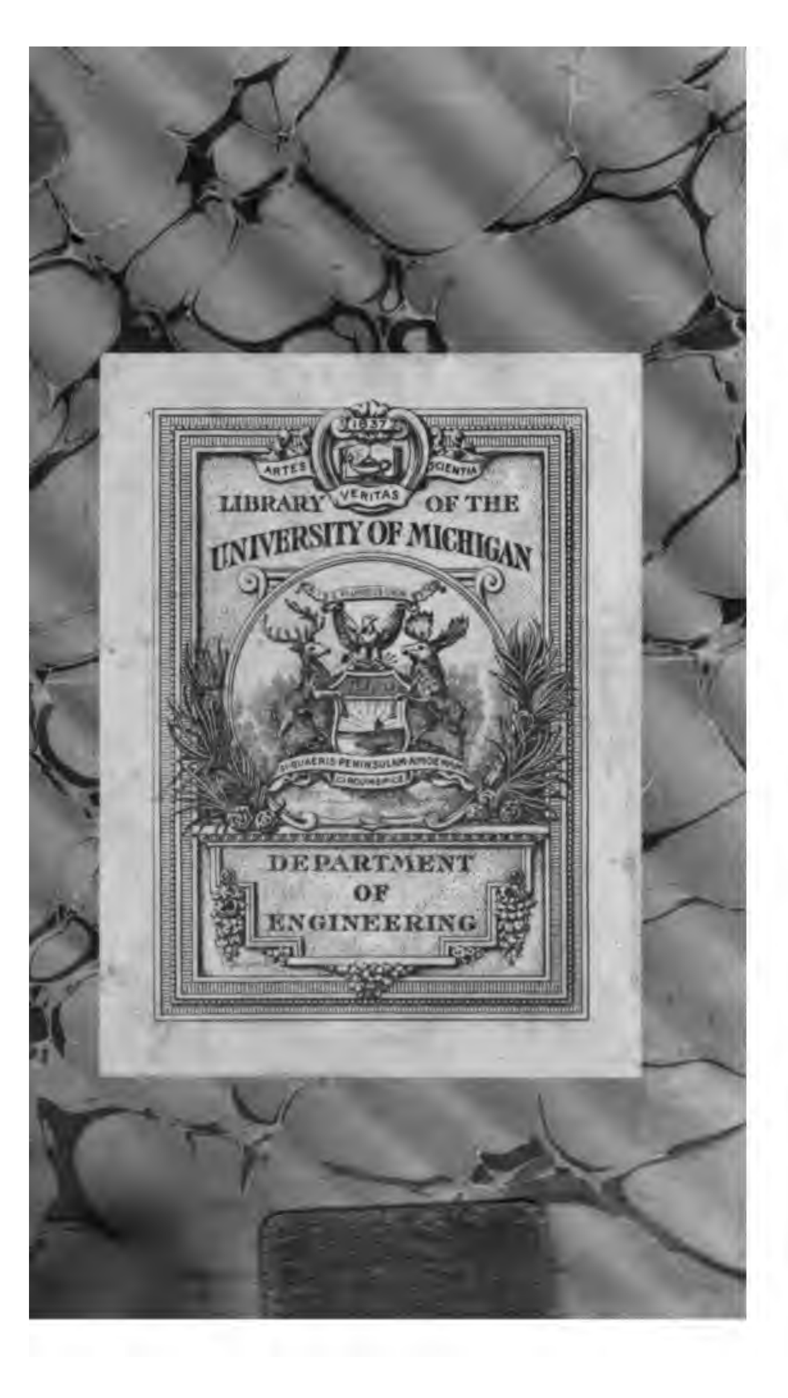



1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING







Nouvelle Collection scientifique
Directeur : Émile Borel

L'Aviation

PAR

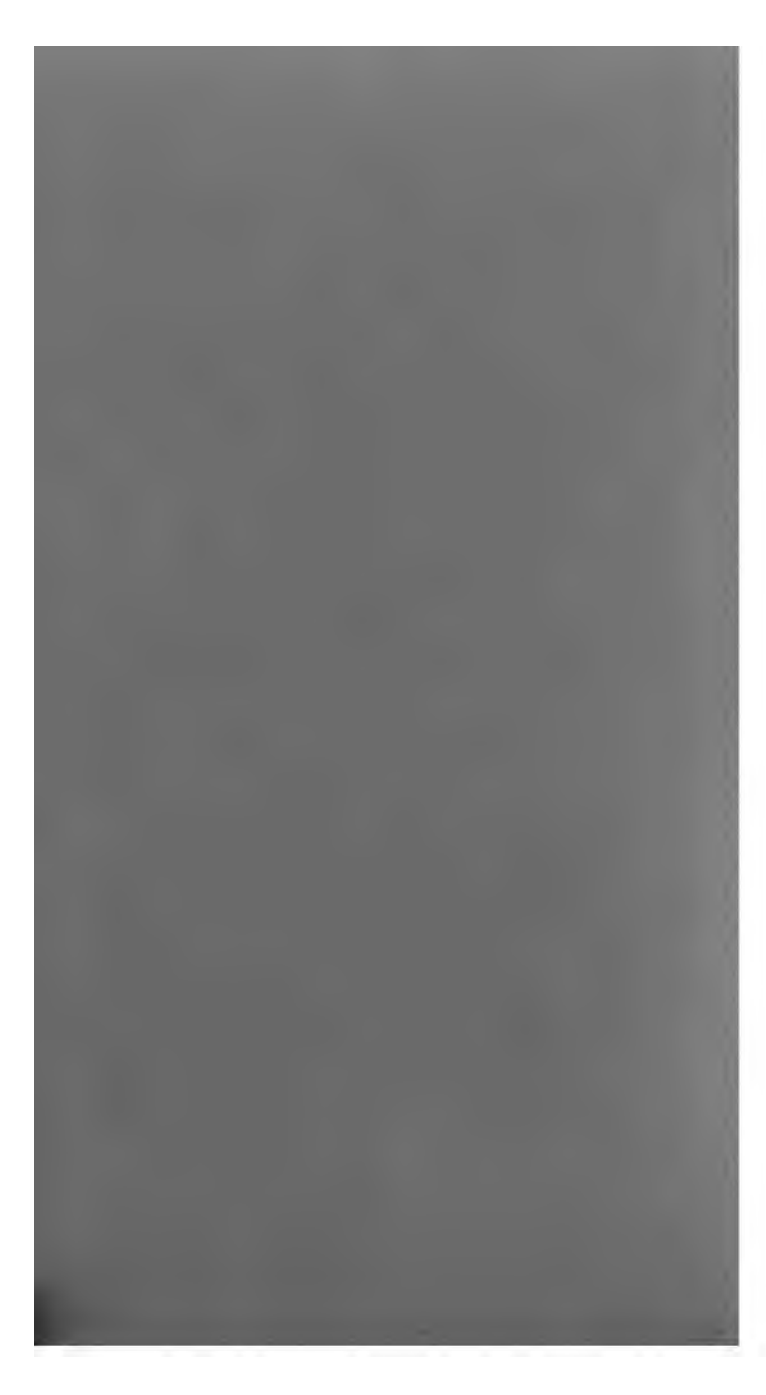
PAUL PAINLEVÉ
Membre de l'Institut
Prof. à la Faculté des sciences de Paris
et à l'École Polytechnique

ÉMILE BOREL
Professeur à la Faculté des sciences
de Paris

AVEC 52 GRAVURES

TROISIÈME ÉDITION

FÉLIX ALCAN, ÉDITEUR



L'Aviation

FÉLIX ALCAN, ÉDITEUR

NOUVELLE COLLECTION SCIENTIFIQUE

Directeur: ÉMILE BOREL

Volumes in-16 à 3 fr. 50 l'un.

Éléments de Philosophie Biologique, par F. LE DANTEC, chargé du cours de biologie générale à la Sorbonne. 2e édition, 1 vol. in-16 . . . . 3 fr. 50

La Voix. *Sa culture physiologique. Théorie nouvelle de la phonation*, par le Dr P. BONNIER, laryngologiste de la clinique médicale de l'Hôtel-Dieu, 3e édition. 1 vol. in-16 illustré. . . . . 3 fr. 50

De la Méthode dans les Sciences:

1. *Avant-propos*, par M. P.-F. THOMAS, docteur ès lettres, prof. de philosophie au lycée Hoche. — 2. *De la Science*, par M. Emile PICARD, de l'Institut. — 3. *Mathématiques pures*, par M. J. Tannery, de l'Institut. — 4. *Mathématiques appliquées*, par M. PAINLEVÉ, de l'Institut. — 5. *Physique générale*, par M. BOUASSE, professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse. — 6. *Chimie*, par M. JOB, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers. — 7. *Morphologie générale*, par A. GIARD, de l'Institut. — 8. *Physiologie*, par M. LE DANTEC, chargé de cours à la Sorbonne. — 9. *Sciences médicales*. par M. Pierre DELBET, professeur à la Faculté de Médecine de Paris. — 10. *Psychologie*, par M. Th. RIBOT, de l'Institut. — 11. *Sciences sociales*. par M. DURKHEIM, professeur à la Sorbonne. — 12. *Morale*, par M, LÉVY-BRUHL, professeur à la Sorbonne. — 13. *Histoire*, par M. G. MONOD, de l'Institut. 2e édit., 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

L'Éducation dans la Famille. *Les Péchés des parents*, par P.-F. THOMAS, professeur au lycée de Versailles. 3e édit. 1 vol. in-16 . . . . 3 fr. 50

La Crise du Transformisme, par F. LE DANTEC. 1 volume, 2e édit. in-16. . . . . 3 fr. 50

L'Énergie, par W. OSTWALD, professeur honoraire à l'université de Leipzig). Traduit de l'allemand par *E. Philippi*, licencié ès sciences, 2e édit. 1 vol. in-16. 3 fr. 50

Les États physiques de la Matière, par CH. MAURAIN, professeur à la Faculté des Sciences de Caen. 1 vol. in-16. illustré. . . . . 3 fr. 50

La Chimie de la Matière vivante. par Jacques DUCLAUX, préparateur à l'Institut Pasteur. 1 volume in-16 3 fr. 50

L'Aviation, par Paul PAINLEVÉ, de l'Institut et Émile BOREL. 1 volume in-16 illustré . . . . 3 fr. 50

L'Aviation

PAR

Paul PAINLEVÉ
Membre de l'Institut.
Prof. à la Faculté des Sciences de Paris
et à l'École Polytechnique.

Émile BOREL
Professeur à la Faculté des Sciences
de Paris.

Avec 52 gravures dans le texte.

TROISIÈME ÉDITION



FÉLIX ALCAN, ÉDITEUR
108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

1911

PRÉFACE

Voici quelques cent vingt ans que, sur des montgolfières d'abord, puis sur des ballons, l'homme s'est aventuré à travers l'océan aérien. Dépassant l'aigle et le condor, le sphérique a effectué de sublimes trouées dans l'azur. Les poètes ont chanté ses gloires et ses martyrs; ils ont célébré l'audace de ces conquérants de la hauteur qui osaient achever

> par l'osier des nacelles
> L'attentat commencé par le roc des Titans[1].

Mais le sphérique est le jouet du vent, il va où l'air le mène et non pas où le conduit le pilote. En le munissant d'un moteur, en l'allongeant en forme de poisson, Krebs et Renard, en 1884, lui ont donné la direction,

1. Sully Prudhomme, *Le Zénith*.



ou du moins, ils lui ont permis de se diriger dans une certaine mesure. Malgré les progrès réalisés depuis lors, qui ne voit que c'est là une solution bâtarde et provisoire? Sur un ballon comme sur un dirigeable, l'homme ne surmonte son propre poids qu'en s'accrochant à une énorme masse de gaz plus léger que l'air. Mais quel embarras qu'un tel support, gigantesque, mou, flasque, inerte, vulnérable et prêtant une prise presque irrésistible aux moindres remous de l'air.

Loin de nous la pensée de médire d'une des belles inventions du génie humain, dont pendant quinze ou vingt ans on peut attendre encore tant de services. Mais un fait certain, c'est que le dirigeable ne nous réserve plus de surprises. Ses défauts sont irrémédiables. Il lui faudra toujours des hangars immenses, sa manœuvre sera toujours extrêmement délicate; sa sortie et sa rentrée, toujours dangereuses, exigeront un personnel considérable. Ses vitesses actuelles ne pourront être notablement dépassées.

Il existe aujourd'hui des dirigeables qui font 16 mètres à la seconde, c'est-à-dire près de 58 kilomètres à l'heure, du moins dans les circonstances les plus favorables. C'est presque la limite de leur vitesse.

Belle vitesse, dira-t-on, et qui leur permet de sortir par les temps où le vent ne dépasse pas 16 mètres à la seconde, c'est-à-dire presque toute l'année. Erreur : un vent de 16 mètres à la seconde s'accompagne toujours de remous violents qui bousculeraient l'énorme appareil.

En fait, jusqu'ici, nous ne croyons pas qu'un dirigeable ait affronté impunément un vent de 10 mètres à la seconde. Or les aéroplanes ont volé par des vents plus violents et leurs vitesses atteignent et dépassent déjà 80 kilomètres à l'heure, soit 22 mètres à la seconde.

Ceci est l'opinion même de ceux qui ont réalisé ou perfectionné les dirigeables. Lorsque Renard, alors jeune capitaine du génie, mettait un moteur sur le ballon *La France*, il frémissait d'impatience de ne point posséder le moteur assez léger pour lui permettre de s'attaquer au problème définitif, au plus lourd que l'air. Seul, d'après lui, le plus lourd que l'air, avec ses organes minces, à la fois résistants et souples, avec ses dimensions bien plus restreintes, pouvait permettre à l'homme de rivaliser avec l'oiseau.

Mais rivaliser avec l'oiseau n'était-ce pas une chimère ? C'est une évolution de millions d'années qui a abouti à l'oiseau, qui lui a

donné sa forme, des ailes bien adaptées à son poids, des muscles assez forts pour mouvoir ses ailes, des filets nerveux répartis dans toute la masse de son corps et capables de répondre, par des réflexes instantanés, aux moindres fluctuations du vent. Plus lourd que l'albatros et le condor et comparativement beaucoup plus faible, sans adaptation, sans éducateur pour le guider, comment l'homme aurait-il la prétention d'égaler un pareil modèle? Léonard de Vinci mettait des ailes aux pieds et aux bras d'un de ses apprentis, l'emmenait sur le haut d'une tour et lui disait : « Saute. » Mais lui-même restait sur la tour. Prudente réserve, sinon héroïque, car, condamné à ses seules ressources musculaires, l'homme est condamné à la chute. Pour qu'il soit capable de voler, de grandes et larges ailes artificielles, un puissant moteur auxiliaire lui sont indispensables. C'est donc avec toute cette machinerie qu'il lui faudra s'élancer dans l'air et trouver dans ce fluide presque impalpable, fuyant, mille fois plus léger que son propre corps, à la fois un point d'appui, son équilibre et sa vitesse.

Les anciens attribuaient un cœur d'airain aux premiers navigateurs. Quel cœur por-

taient-ils donc, nos modernes Argonautes, quand, empêtrés de leurs pesants appareils, ils ont prétendu exiger d'un moteur brutal ou de morceaux de toile et de bois, insensibles et inertes, cette justesse et cette rapidité merveilleuse de manœuvre dont est fait l'équilibre de l'oiseau ? Comment osaient-ils tenter l'apprentissage de ce sport émouvant où la première faute risque d'être fatale ? A moins d'un prodige, c'était la mort, semblait-il, qui guettait leur premier coup d'aile.

Eh bien, le prodige est aujourd'hui réalisé. Des centaines d'hommes ont quitté le sol sur un plus lourd que l'air. Et si quelques-uns d'entre eux, hélas, ont payé de leur vie leur hardiesse, beaucoup d'autres poursuivent leurs exploits aériens, remportant de jour en jour de nouvelles et plus décisives victoires. Honneur aux victimes et aux héros! gloire à l'aéroplane!

A côté de ces conquérants de l'air, le rôle des théoriciens apparaît au premier abord bien effacé et bien modeste. Mais cette impression ne résiste pas à l'examen historique des faits. L'aéroplane a été imaginé théoriquement par l'anglais Cayley en 1809 et sa théorie, maintes fois reprise, n'a pu être perfectionnée que grâce aux ressources de la méca-

nique rationnelle. Le français Alphonse Pénaud qui réalisa en 1872 le premier aéroplane-joujou, était essentiellement un théoricien et, si la réalisation effective de l'appareil industriel a été retardée, c'est pour une difficulté que les théoriciens avaient signalée, mais qu'ils ne pouvaient immédiatement résoudre : le poids des moteurs. Il est donc incontestable que, dans l'histoire de l'aviation, comme dans celle de toutes les grandes découvertes scientifiques et industrielles, la théorie et la pratique ont été assez intimement mêlées pour que l'on doive les proclamer également indispensables à l'œuvre réalisée. Faut-il supposer qu'il en sera autrement pour les progrès futurs ? Ce serait un singulier paradoxe. Sans doute, en des matières aussi complexes, la théorie seule est impuissante, car on ne peut tenir compte dans les équations de toutes les circonstances du problème. Mais l'expérimentation livrée au hasard ne serait guère plus féconde, car, faute de principes directeurs, elle s'égarerait en mille tentatives sans issue. Le progrès ne peut naître que de la coopération entre la théorie et la pratique. Dans cette coopération, le rôle de la théorie se réduit à fournir des indications, des suggestions, des directions; c'est

toujours l'expérience qui doit avoir le dernier mot; mais ce rôle de la théorie, pour être en apparence accessoire, n'en est pas moins essentiel, et il serait injuste de l'oublier. C'est pourquoi, bien que cet ouvrage ne soit en rien un traité théorique d'aviation, nous avons cru devoir y ajouter en appendice quelques développements sur la mécaniqûe de l'aéroplane. Nous espérons être ainsi utiles à une catégorie importante de lecteurs, et les préparer à la lecture d'ouvrages plus techniques, ou de recherches théoriques plus développées[1]. Mais ce n'est point là l'essentiel de ce petit livre. Nous nous sommes surtout efforcés d'y mettre à la portée du plus grand nombre possible d'esprits cultivés les lignes essentielles de l'histoire du plus lourd que l'air, la contribution qu'apporte à la solution de ce problème l'étude du vol des oiseaux, la comparaison des diverses solutions proposées (orthoptères, hélicoptères, cerfs-volants, aéroplanes), les avantages et inconvénients de chacune d'elles, les raisons essentielles de la supériorité actuelle de l'aéroplane, les caractéristiques des divers types d'aéroplanes, et

1. Nous nous permettons de signaler à ceux que ce côté théorique intéresserait la publication prochaine des leçons professées en 1909-1910 à l'Ecole supérieure d'aéronautique, par M. Paul Painlevé.

les principes essentiels de leur fonctionnement. Nous avons terminé par quelques considérations sur l'avenir de l'aéroplane; ce dernier chapitre ne pouvait avoir évidemment le même caractère objectif que le reste de l'ouvrage; il nous a cependant paru qu'il ne nous était pas possible de nous refuser à faire connaître notre opinion sur des questions, telles que l'utilisation militaire de l'aéroplane, qui préoccupent à si juste titre beaucoup d'esprits.

PAUL PAINLEVÉ   ÉMILE BOREL

Paris, le 10 avril 1910.

L'AVIATION

INTRODUCTION

HISTORIQUE DE L'AVIATION

Dans ce bref historique nous distinguerons quatre périodes : la période légendaire, la période héroïque mais ignorante, qui se termine vers la fin du XVIIIᵉ siècle; la période scientifique, qui se confond à peu près avec le XIXᵉ siècle; enfin, la période industrielle, qui commence avec le le XXᵉ siècle. Nous nous bornerons d'ailleurs à décrire les faits tels qu'ils se seraient présentés au spectateur attentif mais non technicien. Les explications et les commentaires seront mieux à leur place dans les chapitres suivants.

La période légendaire.

De tous temps, les hommes ont rêvé d'imiter les oiseaux. Bien que ce rêve parut chimérique à la majorité d'entre eux, il s'est rencontré quelques audacieux ou quelques fous qui tentèrent de le réaliser. Ces tentatives, vouées à l'insuccès, sont mal connues par des témoignages souvent uniques et parfois suspects, dans lesquels il n'est

pas toujours aisé de faire la part de la légende et celle de l'histoire. Leur étude critique pourrait tenter un historien et mener peut-être à des résultats intéressants. Une telle recherche est en dehors de notre plan ; c'est du côté de l'avenir que nous voulons surtout regarder ; nous nous contenterons donc de signaler rapidement ces précurseurs légendaires.

Chaque peuple nous offre un dieu ou un héros qui tenta la conquête de l'air.

Dans l'Inde, c'est Hanouman, le singe dieu qui s'élança jusqu'au soleil.

Les antiques *Sagas* abondent en merveilleuses histoires de manteaux de plumes qu'endossaient les vierges d'Islande pour s'élancer au-dessus de l'océan brumeux, comme si les rudes Wikings, dans leur bataille incessante contre le flot, eussent caressé l'espoir de lui échapper un jour.

Il avait un habit de plumes, le fils de la princesse scandinave et il volait sur les eaux. Lorsque sa mère le portait en son sein, tandis qu'elle voguait en barque avec son époux, elle fut poursuivie par un monstrueux corbeau qui heurtait l'esquif de son bec, menaçant de le chavirer. Pour sauver son époux, la princesse fit don au corbeau « de tout ce qu'elle avait sur elle » et elle ne songea pas au petit enfant qu'elle allait mettre au monde. Bien plus tard, cet enfant devenu grand, revêtu des ailes que lui avait données sa mère, volait vers sa fiancée au-dessus de la mer du Nord lorsque le monstrueux corbeau le poursuivit et le dévora.

Henri Heine conte comment quelques-unes de ces vierges qui savaient voler s'en vinrent se bai-

gner un jour dans un lac, comment, pour se baigner, elles quittèrent leurs habits de plume, et quelle audace eut un jeune prince aux aguets. Séduit par les baigneuses, il s'empara de l'un des manteaux de plume qui les rendaient pareilles aux oiseaux. Si bien que lorsque ses compagnes prirent leur vol, l'une des jeunes filles demeura sur la rive. Le prince l'emmena. Bien plus tard, elle retrouva son habit de plume et put s'envoler à son tour. Peut-être, disent les malicieux conteurs, était-ce le prince lassé qui lui avait rendu ses ailes.

Cette même légende se retrouve dans les *Mille Nuits et une Nuit*. Le bel adolescent de l'un des contes rencontre trois jeunes filles aux manteaux de colombes qui se baignent en un bassin d'argent. Pareil au prince scandinave, il dérobe l'un des manteaux et épouse la jeune fille qui ne peut s'envoler avec ses sœurs....[1]

....Les riches imaginations orientales décrivent toutes sortes d'appareils volants, tantôt magiques, tantôt dus à l'ingéniosité des hommes. Tel ce cheval d'ébène offert au roi Sabour par un savant de Perse « versé dans les diverses branches des connaissances les plus secrètes et des arts les plus subtils, sachant modeler les formes avec une perfection qui confondait l'entendement et n'ignorant aucun des mystères qui échappent d'ordinaire à l'esprit humain... ». Ce cheval était une merveille de la science. Grâce à un mécanisme intérieur, il

1. *Les Mille Nuits et une Nuit*, traduction Mardrus, vol. VII, page 132.

s'élevait dans les airs lorsqu'on pressait la « cheville d'ascension » pour se mettre à doucement redescendre sitôt qu'on pressait la « cheville de descente... »[1].

Un jeune prince inconsidéré l'enfourche, touche la cheville d'ascension sans avoir reçu de leçons et s'élève « dans les airs sans s'arrêter, tellement qu'il fut sur le point de toucher le soleil. Alors il comprit le péril qu'il courait et quelle mort affreuse l'attendait dans ces régions du ciel. Mais, doué d'intelligence et de sagacité, il se mit à faire des recherches sur toutes les parties du cheval et finit par trouver une petite vis, pas plus grosse qu'une tête d'épingle sur le côté gauche de la selle. Il se dit : « Je n'en vois pas d'autre ! ». Alors il pressa cette vis et aussitôt l'ascension diminua peu à peu et le cheval s'arrêta un instant dans les airs pour, aussitôt après, commencer à descendre avec la même rapidité en se ralentissant ensuite petit à petit, à mesure que l'on approchait de la surface du sol. Et il finit par toucher terre sans secousse aucune... ».

Plus caractéristique est la légende de Wieland et de son frère Egil, les héros islandais. Prisonnier d'un roi danois qui, afin de le mieux garder, lui a fait couper les jarrets, Wieland, pour s'échapper, construit des ailes qu'Egil consent à garnir de plumes, sous la condition qu'il volera le premier. Wieland, craignant qu'il ne prenne la clef des champs, lui donne à dessein le conseil

1. *Les Mille Nuits et une Nuit*, traduction Mardrus, vol. VIII, page 70.

insidieux de partir contre le vent et de descendre dans le sens du vent ; à la descente Egil fait une chute terrible. Sous prétexte de perfectionner l'appareil, Wieland l'endosse et s'enfuit pour ne plus revenir. Il est intéressant de remarquer que cette perfidie légendaire décèle une idée juste de la manœuvre d'un aéroplane.

Puis voici la Grèce avec Dédale et son fils Icare. Prisonniers comme les Islandais Wieland et Egil, ils s'enfuirent de l'île de Crête au moyen d'ailes analogues à celles des oiseaux, fixées à leurs épaules par de la cire. Chacun sait qu'Icare, s'approchant trop près du soleil, la cire de ses ailes fondit et qu'il tomba dans la mer.

Il est difficile de savoir s'il y eut quelque tentative d'aviation à l'origine de cette légende naïve. La conclusion en était peu encourageante. Les ailes de Dédale hantèrent cependant bien des cerveaux et servirent sans doute de modèle à quelques inventeurs, car nombreux sont les hommes qui, ne pouvant avoir une idée nouvelle, se sentent uniquement capables de modifier en la perfectionnant une idée ancienne : tel fut le cas d'un moine anglais du XVIe siècle, O. de Malmerbury, qui ne trouva rien de mieux que d'imiter Dédale. Le texte d'Ovide lui suggéra les dispositions essentielles ; le résultat fut d'ailleurs malheureux : s'il ne se noya pas, l'imitateur d'Icare se brisa du moins les jambes. Pareille mésaventure était arrivée au XVe siècle à Péronne à J.-B. Dante essayant des ailes, peut-être aussi imitées de celles de Dédale.

La période héroïque.

En même temps que ces tentatives malheureuses, la Renaissance nous apporte les premières recherches théoriques sur le problème de l'aviation, peut-être suggérées, elles aussi, par les légendes grecques. On les doit au génie si vraiment universel de Léonard de Vinci[1] : dans les dernières années du XVe siècle, il réalisa des plans assez détaillés d'appareils à voler, basés sur l'imitation de l'oiseau ; il imagina aussi le principe du parachute ; il est moins sûr qu'il ait eu l'idée de l'hélicoptère. De telles recherches étaient évidemment prématurées ; les moyens mécaniques dont disposait l'homme à cette époque étaient insuffisants pour en permettre même une réalisation partielle.

De plus, à l'époque de Léonard de Vinci, la mécanique moderne n'était pas encore constituée ; on sait que les notions fondamentales de force et d'inertie ne furent véritablement élucidées qu'après les travaux de Galilée et ceux de Newton. Or, s'il ne faut pas exagérer le rôle que peuvent jouer dans les inventions mécaniques, les développements analytiques compliqués, presque toujours superflus, il n'en est point de même des principes mêmes de la mécanique. Nous avons de la peine à nous représenter l'état d'esprit des hommes du XVe siècle, tant ces prin-

1. Peut-être doit-on, sur ce terrain, mentionner Roger Bacon comme précurseur de Léonard de Vinci.

cipes nous sont devenus familiers ; il est cependant nécessaire de s'y efforcer, si l'on veut se rendre compte quel rôle important, souvent inconscient, joue dans une invention mécanique quelconque la connaissance des lois de la composition des forces et l'équation fondamentale de la mécanique (la force égale le produit de la masse par l'accélération). Sans ces principes simples, l'aéroplane n'aurait certainement pas été inventé. Mais bien entendu, leur connaissance ne pouvait suffire à réaliser cette invention ; et, longtemps après Newton, les tentatives isolées qui se produisirent ne furent pas plus heureuses que les précédentes. On cite celle du jésuite portugais Bartoloméo Gusmao, à Lisbonne, vers 1705 ; du marquis de Bacqueville, à Paris, en 1742 : il tenta de traverser la Seine en se lançant du haut de son hôtel, au coin de la rue des Saints-Pères. On cite, vers la même époque, un essai d'Allard, à Saint-Germain. Allard et Bacqueville s'estropièrent tous deux. En 1772, le chanoine Desforges ne fut pas plus heureux avec un cabriolet volant, lancé du haut de la tour d'Etampes. Blanchard à Paris, en 1781, construisit aussi un chariot volant dont on ne sait pas s'il vola. Une tentative mieux réussie, mais incertaine, est celle de Besnier, à Sablé, qui aurait pu, sans accident, descendre en volant du haut d'un toit, en 1769. En admettant même la réalité de cet essai, il est difficile de savoir si on doit le regarder comme un vol ou comme une descente en parachute.

Il semble bien d'ailleurs que, si ces diverses

tentatives avaient été tant soit peu couronnées de succès, elles auraient rencontré un plus grand nombre d'imitateurs. Les essais cités sont déjà assez nombreux (Cf. Meervolin, Giessen 1781, Deghen 1812, etc.) pour que l'on puisse affirmer que le problème de l'aviation ne risquait pas d'être oublié et devait être résolu dès que les progrès des moyens mécaniques seraient suffisants.

Ces progrès devaient exiger un siècle pendant lequel l'invention des ballons sphériques (Montgolfier et Charles, 1783) allait faire envisager le problème de la conquête de l'air d'un tout autre point de vue. On sait quelle a été l'extension prise par le ballon sphérique et par son perfectionnement, le dirigeable. Son étude est en dehors de notre plan, non que nous en méconnaissions l'intérêt, mais parce qu'elle nous semble ressortir plutôt du domaine de la physique que de celui de la mécanique.

La découverte des aérostats prouvait que la conquête de l'air n'était pas une chimère tout à fait irréalisable. Bien que le « plus léger que l'air » parut s'opposer au « plus lourd que l'air », la défaveur de celui-ci auprès des chercheurs ne pouvait être que momentanée. Et le fait que l'attention des savants était attirée par l'atmosphère et ses propriétés, devait être profitable aux progrès de l'aviation.

La période scientifique.

« Point n'est besoin d'espérer pour entreprendre, ni de réussir pour persévérer. » Telle

eut pu être la fière devise de la plupart des hommes dont nous allons parler. Ils furent véritablement des héros, puisqu'ils se rendirent compte des difficultés inouïes du problème qu'ils abordaient, difficultés telles que la solution apparaissait invraisemblable à moins d'un miracle. Ils savaient que ce serait dans un avenir peut-être lointain, que pourraient aboutir à un résultat pratique les recherches qu'ils donnaient comme but à leur vie ; ils savaient que, dans le cas trop probable d'insuccès, ils ne devaient compter que sur l'ingratitude et l'ironie de leurs contemporains, car celui qui devance son époque sera toujours traité de fou. Mais ils ne se laissèrent point rebuter. C'est à eux que l'on doit en définitive, le magnifique mouvement auquel nous assistons. Si l'homme vole aujourd'hui, c'est parce que les Cayley, les Pénaud, les Lilienthal ont espéré contre toute espérance [1].

En 1809, l'anglais sir Georges Cayley publia [2] la première théorie mécanique complète de l'aéro-

1. Pour donner une idée de l'état d'esprit dans lequel étaient, il y a très peu d'années, certains esprits distingués au sujet de l'aviation, citons un curieux passage de la thèse de doctorat de M. Pierre Lasserre : *Le Romantisme français*, soutenue au début de 1906 devant la Faculté des Lettres de Paris (Mercure de France, éditeur). On se rappelle peut-être que cette thèse est un violent pamphlet contre la société moderne et les philosophes du XVIIIe siècle. L'auteur cite un passage de Condorcet où celui-ci émet l'hypothèse que la moralité humaine se perfectionnera peut-être beaucoup dans l'avenir ; pour exprimer à quel degré cette idée lui semble ridicule, M. Pierre Lasserre s'écrie : « Qui sait si nous n'aurons pas aussi des ailes pour voler ? La dénégation serait exactement aussi vaine que l'hypothèse. » (*Loc. cit.*, p. 439).

2. *Journal de Nicholson.*

plane. Sans être bien évidemment parfaite en tous points (la théorie parfaite n'existe point en mécanique), cette théorie mettait nettement en évidence le principe fondamental de la sustentation obtenue par la vitesse. Malgré son importance considérable, le mémoire de Cayley passa, semble-t-il, à peu près inaperçu. Soixante ans plus tard il fut exhumé par Pénaud dont nous parlerons tout à l'heure.

Si nous omettons les recherches sur les cerfs-volants et parachutes (voir plus loin, ch. III), on ne trouve à citer, durant un long espace de temps, que des expériences infructueuses. Un projet d'aéroplane dû à Henson en 1842-1843 ; les essais de planement de Le Bris en 1856, les biplans planeurs de Wenham en 1866. Faute de cohésion et de persévérance parmi les chercheurs, faute surtout sans doute, d'un premier succès attirant l'attention du public, ces efforts furent à peu près perdus.

La guerre franco-allemande mit en évidence le rôle que pouvaient jouer les ballons en cas de siège. Le public fut intéressé et la *Société française de Navigation aérienne* put réunir, dès 1872, de nombreux savants et chercheurs préoccupés de la conquête de l'air. On trouve dans l'*Aéronaute* l'histoire de cet effort collectif, l'un des plus intéressants qui aient été tentés. Peu de chapitres de l'histoire de la science et de l'industrie sont aussi captivants et autant à l'honneur de la France. Le ballon sphérique tient naturellement une très grande place dans les travaux de ces hommes de 1872 ; mais plusieurs

d'entre eux ont l'intuition de l'importance du « plus lourd que l'air » et lui consacrent le plus clair de leurs efforts. Au premier rang de ceux-ci était un jeune mécanicien auquel une mort prématurée ne permit point d'aller jusqu'au bout de ses conceptions.

De suite, Alphonse Pénaud s'engagea dans la voie que nous connaissons aujourd'hui comme la meilleure. Toutes ses préférences vont à l'aéroplane et, s'il parle parfois de l'hélicoptère, il semble bien que ce soit pour intéresser à ses travaux ceux de ses collègues dont l'âge et l'autorité ne lui permettent pas de négliger l'opinion. Il exhume avec enthousiasme le mémoire de Cayley, écrivant à ce sujet :

« Voilà un homme qui indique la plupart des conceptions qui feront la navigation aérienne : c'est à Londres, dans un journal scientifique des plus répandus ; eh bien, il ne se trouve personne qui comprenne la portée de cet esprit, qui l'encourage, qui l'aide et qui soit stimulé par ses vivifiantes pensées. »

Pénaud fut moins isolé que Cayley. Un de ses mémoires fut même couronné par l'Académie des Sciences. Mais il y a loin, comme il s'en rendait compte, de l'admiration froide imposée par ses recherches à l'enthousiasme fécond qui lui eut valu des concours efficaces.

Pénaud construisit le premier aéroplane-joujou qui ait eu un fonctionnement régulier. C'était un monoplan, avec hélice à l'arrière, assez analogue aux appareils actuels, mais où le moteur était remplacé par un ressort en caoutchouc. L'appa-

reil fonctionnait donc pendant un temps appréciable *en utilisant une force motrice qu'il emportait avec lui ;* c'est ce qui différencie très nettement l'expérience de Pénaud des expériences antérieures, dans lesquelles on n'avait réalisé qu'une *chute* plus ou moins heureusement amortie par la résistance de l'air. Ces expériences antérieures pouvaient être utiles pour faire connaître les propriétés des surfaces portantes et pour instruire les pilotes ; elles n'en concernaient pas moins des appareils d'une nature essentiellement différente de ceux qui pourraient permettre un jour le vol artificiel. Ce n'est point voler que se laisser glisser sur une pente aérienne en perdant constamment de l'altitude.

Au contraire, et il n'est pas inutile d'insister sur ce point, l'aéroplane-joujou de Pénaud est véritablement un appareil qui vole. Ce serait, pour des fourmis capables de s'en servir, l'aéroplane parfait. Il leur permettrait de franchir des dizaines de mètres, c'est-à-dire plusieurs milliers de fois la longueur de leur corps. Il suffirait que ces fourmis soient assez ingénieuses pour imaginer un système d'engrenage, par lequel, déployant une force très faible pendant un temps plus long, elles réaliseraient la tension du ressort de caoutchouc.

Que faudrait-il donc pour que l'aéroplane de Pénaud put servir à l'homme et non pas seulement à la fourmi ? Simplement que la puissance du moteur (le ressort de caoutchouc) puisse être augmentée dans les mêmes proportions que les dimensions de l'aéroplane et le poids à por-

ter[1]. C'est donc le problème du moteur léger qui se pose. C'est de lui et de lui seul que dépend l'avenir de l'aviation et si Pénaud, au lieu de mourir à trente ans, avait vécu jusqu'à l'invention du moteur à quatre temps, on peut penser avec certitude qu'il aurait réalisé l'aéroplane actuel.

L'effort de Pénaud ne fut, du moins, pas inutile. L'intérêt éveillé désormais par l'aviation était suffisant pour ne pas cesser de préoccuper avec passion un groupe d'initiés dont nous retrouverons les noms parmi les précurseurs immédiats du mouvement actuel. Avant d'y arriver, nous devons saluer la mémoire d'un des plus grands parmi les héros et les martyrs de l'aviation : l'allemand Lilienthal. Pénaud avait démontré qu'un appareil volant, bien équilibré, reste bon planeur, moteur éteint. Le moteur léger n'étant pas trouvé et la réalisation effective de l'aéroplane à moteur n'étant pas possible, l'étude de l'aéroplane sans moteur était la seule voie ouverte à l'expérimentation. Dès 1891, Lilienthal étudia l'équilibre, la gouverne, l'atterrissage d'un planeur moteur. Il se tua à sa 2.000e glissade aérienne, le 9 août 1896, victime de sa magnifique hardiesse.

Pénaud avait prouvé qu'une hélice, mue avec une force suffisante, pouvait propulser un aéroplane et Lilienthal, qu'un pilote habile pouvait diriger le planeur propulsé, et atterrir sans un trop grave danger. Les difficultés essentielles du

1. Pour formuler ce problème sous une forme mathématique précise, il faut faire intervenir les considérations sur l'*homothétie en mécanique* dont nous dirons un mot plus loin. (Note II.)

problème de l'aviation, celles qui étaient inhérentes à sa nature particulière, étaient élucidées ; il ne restait plus qu'à résoudre un problème essentiel : le moteur léger et à surmonter les difficultés qui séparent toujours la conception scientifique de la réalisation industrielle.

La période industrielle.

Cette période commence avec la construction des premiers aéroplanes de grande dimension, à la fin du XIXe siècle. Nul n'ignore plus qu'un aéroplane, c'est essentiellement un plan légèrement incliné vers le haut (de l'arrière à l'avant) et dont l'envergure, à droite et à gauche, l'emporte beaucoup sur sa largeur dans le sens transversal. Si, par exemple, il a six mètres à droite et six mètres à gauche, sa largeur de l'arrière à l'avant n'est que de deux à trois mètres. A ce plan incliné, est fixée une hélice d'axe horizontal, qui tourne très rapidement dans l'air sous l'action d'un moteur. Cette hélice propulse l'appareil en avant, exactement comme une hélice marine, tournant dans l'eau, propulse un navire. Imaginons l'appareil, fixé sur un châssis léger d'automobile, propulsé par une hélice ; il se met en marche et roule d'abord sur le sol comme une automobile, avec une vitesse croissante. L'air souffleté par le plan incliné, qui s'avance rapidement, lui résiste par en dessous, tend à le soulever tout en s'opposant à sa marche, et le soulève, si la vitesse devient suffisante.

La résistance de l'air croît en effet très rapidement avec la vitesse. Par exemple, admettons

que, pour une vitesse de 20 kilomètres à l'heure, la résistance de l'air allège de 200 kilogrammes le poids d'un aéroplane ; pour une vitesse double, (c'est-à-dire de 40 kilomètres à l'heure), ce n'est pas une poussée double, mais quadruple, donc de 800 kilogrammes que l'air exercera par en dessous, sur l'aéroplane. Si l'appareil pèse 500 kilogrammes, quand l'hélice lui aura communiqué une vitesse de 20 kilomètres, il aura déjà perdu 200 kilogrammes de son poids ; si sa vitesse continue à croître, bien avant qu'elle ait doublé, l'appareil se soulèvera au-dessus du sol, et il volera tant que sa vitesse restera suffisante.

On voit que l'aéroplane n'est nullement comparable à un ballon, même dirigeable, ou à un navire. Que le moteur du navire ou du ballon s'arrête, le navire continue à flotter sur la mer ou le ballon dans l'air. Au contraire, toute défaillance du moteur entraîne l'atterrissage de l'aéroplane ; car, dès que l'hélice cesse de le propulser, sa vitesse, ralentie par la résistance de l'air, devient trop faible pour qu'il se soutienne au-dessus du sol. En un mot, l'aéroplane marche sur le vent et contre le vent ; dès que l'air cesse de le souffleter avec une suffisante vigueur, il atterrit plus ou moins brusquement.

Dans la description sommaire qui précède, nous avons supposé que l'aéroplane ne comprenait qu'un seul plan incliné ; l'appareil est dit alors un « monoplan ». Beaucoup d'appareils comprennent deux plans inclinés parallèles, placés l'un au-dessus de l'autre ; l'appareil, dit alors

« biplan », est comparable à un oiseau qui aurait deux paires d'ailes superposées. On a construit également des triplans et on s'est proposé de construire des multiplans.

Enfin, nous avons supposé l'hélice placée à l'arrière de l'appareil et le propulsant; on peut la placer à l'avant, elle tirera alors l'aéroplane. Au lieu d'une hélice, on peut en employer deux, le principe de la théorie reste le même.

A la fin du XIXe siècle, les essais de fabrication d'aéroplanes deviennent nombreux. Nous ne pouvons mentionner que les plus importants. Deux ingénieurs, disposant de ressources considérables : sir Hiram Maxim en Angleterre, Ader en France, tentèrent la construction de très grands appareils pouvant porter un puissant moteur à vapeur. L'aéroplane de sir Hiram Maxim, construit de 1890 à 1895, avait une surface de 557 mètres carrés et un poids total de 3.640 kilogrammes. Des expériences préliminaires furent faites pour évaluer sa force ascensionnelle en marche horizontale, un dispositif l'empêchant de s'élever. Mal dirigée, une telle masse eut, en effet, été très dangereuse. En fait, l'appareil se brisa au cours de ces expériences préliminaires et fut détruit et abandonné sans avoir quitté véritablement le sol[1]. Vers la même époque, l'avion d'Ader, moins lourd et moins encombrant, fit un essai sur lequel on n'a malheureusement que des détails insuffisants. Il

1. Voir l'ouvrage de sir Hiram Maxim : le *Vol naturel et le Vol artificiel*, traduit par le lieutenant-colonel Espitalier (Dunod et Pinat, 1909).

semble cependant qu'il y eut, sinon vol proprement dit, du moins bond d'une dizaine de mètres suivi d'une chute. Cette expérience eut lieu le 14 octobre 1897, au plateau de Satory, devant les représentants du ministre de la Guerre. Elle parut assez peu concluante pour que le ministère de la Guerre n'ait pas cru devoir continuer ses encouragements à l'inventeur, dont l'appareil fut déposé au Conservatoire des Arts et Métiers. On a pu le voir aussi en décembre 1908 au premier Salon de l'aéronautique. Cette expérience méritait d'être signalée, au moins comme le premier essai poussé à bout du lancement d'un grand aéroplane monté avec moteur.

Cependant, dans la voie ouverte par Cayley et Pénaud, les chercheurs ne restaient pas inactifs. Sans parler des recherches sur le vol des oiseaux et la résistance de l'air, à propos desquelles on doit rappeler le nom de Marey, citons l'ingénieur français Chanute, établi en Amérique, et le professeur Langley. Ce dernier construisit en 1896 un petit aéroplane pesant 13 kilogrammes qui franchit 1.200 mètres. C'était un record dépassant de beaucoup ceux des aéroplanes-joujoux. Chanute reprit les expériences de Lilienthal sur le vol plané ; il fut suivi de près par les frères Wright avec le succès que l'on sait. En France, le capitaine Ferber faisait également des expériences de vol plané. L'un des premiers au courant des expériences de début, à demi-secrètes, des frères Wright, il eut foi en leur succès.

D'autre part, l'ingénieur français Voisin, encouragé par M. Archdeacon, construisait et

essayait des aéroplanes. (Expériences de Berck-sur-mer, 1904. Expériences d'hydroplane sur la Seine, 1905.) De son côté, l'ingénieur Blériot construisait des aéroplanes qu'il essayait lui-même et modifiait sans cesse, ne se laissant pas décourager par de nombreux insuccès.

On sait qu'en 1908, les premiers vols, dépassant quelques minutes [1], furent officiellement contrôlés; ils étaient dus à Farman et Delagrange sur appareils Voisin. Blériot, de son côté, exécuta un premier vol de huit minutes à Issy-les-Moulineaux, le 6 juillet 1908. Les frères Wright, ayant fait beaucoup mieux en Amérique, où leurs premières expériences de vol plané remontent à 1900, se décidèrent à rendre publiques leurs expériences. Wilbur Wright étonna le monde par ses prouesses du camp d'Auvours. En même temps, Farman sur appareil Voisin et Blériot sur l'un de ses appareils réalisaient les premiers voyages aériens. L'aviation triomphait de l'indifférence du public dont l'enthousiasme devait être au comble pendant les semaines d'aviation de l'été et de l'automne 1909 [2].

Cet enthousiasme a été, sinon refroidi, du moins attristé par plusieurs deuils tragiques. Quelques esprits inquiets se sont demandés si les dangers du nouveau mode de locomotion ne

1. Santos Dumont avait réalisé, le 12 novembre 1906, un vol de 220 mètres.

2. Depuis, on doit signaler surtout les résultats obtenus au point de vue de la hauteur : l'altitude de 1.000 mètres au-dessus du sol a été largement dépassée par Latham en France et par le français Paulhan en Amérique.

seraient pas tels que les plus intrépides dussent y renoncer. Il est difficile de traiter cette question *a priori ;* tout au plus peut-on formuler l'espérance que les perfectionnements des appareils et l'habileté croissante des pilotes rendront les accidents relativement moins nombreux.

Si, cependant, faisant pour un instant abstraction de tout sentiment d'émotion, quelque légitime qu'il soit, on se place sur le terrain des faits, il semble que l'on doive mettre tout d'abord à part les accidents survenus aux inventeurs essayant des types nouveaux d'appareils. De tels accidents sont évidemment toujours à craindre et l'on ne peut évaluer leur probabilité. Elle dépend de l'ingéniosité, de la prudence et aussi du courage de chaque inventeur. Considérant seulement les accidents mortels survenus à des aviateurs montant des appareils de types déjà éprouvés, on doit en signaler cinq (avril 1910) : le lieutenant Selfridge, passager d'Orville Wright, à la fin de 1908 ; Lefebvre (appareil Wright) et le capitaine Ferber (appareil Voisin) en 1909 ; Delagrange et Le Blon (appareil Blériot modifié) en 1910. Sans vouloir épiloguer sur chacun de ces accidents, on peut observer que certains d'entre eux paraissent dus, soit à des causes actuellement connues et évitables, comme les deux hélices *indépendantes*, soit à l'emploi d'appareils neufs insuffisamment vérifiés au point de vue de la solidité, soit à la témérité d'hommes de sport tentant de battre des records de vitesse ou d'élégance dans leurs évolutions. D'autre part, le nombre de vols effectués à cette date par les divers aviateurs dépasse cer-

tainement 50.000. On arrive donc, en gros, à la conclusion que la probabilité d'un accident mortel est voisine de 1 sur 10.000, pour chaque essai, si l'on accepte brutalement les résultats de la statistique. Une telle probabilité devrait être regardée comme très élevée si elle ne devait point diminuer; elle classerait la profession d'aviateur à côté de celles regardées comme les plus dangereuses : jockey, torero, dompteur, pêcheurs islandais, etc.

Il n'en est plus tout à fait de même si, au lieu de considérer des professionnels cherchant à réaliser de nouvelles prouesses, modifiant constamment leurs appareils, essayant fréquemment des appareils nouvellement construits, on envisage le passager ou l'amateur par-dessus tout prudents. Le danger de la bicyclette ou de l'automobile n'est pas le même pour les touristes et pour les champions de courses de vitesse. Il ne semble donc pas téméraire, divisant par 10 le chiffre obtenu pour les professionnels, d'évaluer à 1 sur 100.000 la probabilité d'accident mortel pour le passager d'un aviateur expérimenté, montant un appareil déjà connu de lui et bien vérifié et ne se plaçant pas dans des conditions exceptionnelles (mauvais temps, terrain d'atterrissage dangereux, acrobatie aérienne). C'est là un danger supérieur à celui qu'on court en prenant le chemin de fer, et même en circulant en automobile ou à pied dans une grande ville, mais la différence n'est pas telle qu'on ne puisse espérer la voir disparaître. En attendant, on peut dire que le danger de l'aéroplane est tout à fait comparable à celui des automobiles de 60 chevaux.

CHAPITRE PREMIER

VOL DES OISEAUX

Description du vol.

Il suffit d'avoir quelquefois regardé voler les oiseaux pour savoir que tantôt ils agitent leurs ailes et tantôt les laissent étendues et presque immobiles. Si l'on examine d'un peu plus près les divers modes de vol, on se trouve amené à les classer en plusieurs catégories. Cette classification est d'ailleurs assez artificielle, comme toute classification formelle. Elle nous fournira cependant un cadre commode pour la description du vol et nous permettra de préciser la terminologie usuelle. Après l'étude des appareils d'aviation et en particulier des aéroplanes, nous nous rendrons compte qu'en réalité, le vol des oiseaux est souvent un phénomène très complexe, dans lequel sont utilisés *simultanément* les divers modes que nous allons décrire *successivement*.

VOL ORTHOPTÈRE. — L'on voit parfois un oiseau s'élever presque verticalement en battant des ailes : les deux ailes s'abaissent et se relè-

vent simultanément et chaque coup d'aile élève notablement l'oiseau qui, parfois, peut atteindre ainsi plusieurs mètres de hauteur verticale. Ce vol donne une impression de lourdeur. On peut constater expérimentalement qu'il est fatigant pour l'oiseau ; celui-ci n'y a recours que lorsqu'il lui est impossible de voler autrement : si, par exemple, il est enfermé dans une cour aux murs resserrés. Certains oiseaux, en particulier les grands oiseaux de proie, sont incapables de s'élever ainsi. Si on les emprisonne dans une cour à murs verticaux assez élevés, ils ne peuvent s'échapper bien que le ciel soit libre au-dessus de leur tête.

VOL ORNITHOPTÈRE. — Analogue au précédent pour l'observateur qui ne voit qu'un coup d'aile, il s'en distingue essentiellement en ce que le coup d'aile est oblique par rapport à la verticale [1]. Il en résulte que l'oiseau se déplace parallèlement au sol. Il peut d'ailleurs en même temps, suivant les cas, s'élever, s'abaisser ou rester à une hauteur à peu près constante, mais une observation immédiate montre que le but principal des coups d'aile est ici d'acquérir, d'entretenir et de modifier la vitesse parallèle au sol. L'oiseau se propose essentiellement de se rendre d'un point à un autre, d'éviter tels arbres ou tels édifices et ses mouvements en hauteur ne sont qu'accessoires.

1. Il s'agit ici du *départ* : l'oiseau part du repos ; lorsqu'il est en route, il faut, comme nous le verrons plus loin, porter l'attention non pas sur la direction du coup d'aile par rapport à la verticale, mais sur sa direction par rapport au vent relatif.

VOL PLANÉ. — On observe souvent des oiseaux qui se déplacent sans remuer leurs ailes et l'on dit qu'ils planent. L'oiseau planeur, généralement de grande taille, étend ses ailes horizontalement et paraît s'en servir uniquement comme de point d'appui pour glisser sur l'air. Dans une telle glissade, il s'abaisse généralement, c'est-à-dire perd de son altitude ; il regagne ensuite de la hauteur en recourant au vol ornithoptère. L'aigle ou le vautour qui fondent sur leur proie arrivent ainsi à atteindre un point précis, avec une grande vitesse, sans bouger leurs ailes.

La question de savoir si le vol plané pur, tel qu'il vient d'être décrit, est possible indéfiniment en air calme, sans perte de niveau, est encore discutée. On pourrait ne pas s'y arrêter en objectant qu'il ne saurait exister d'air parfaitement calme malgré les apparences. Certains voyageurs et naturalistes dignes de foi produisent cependant des observations de nature à faire réfléchir. Si l'on admet la possibilité de ce vol plané, il est nécessaire pour l'expliquer, de supposer que, si les ailes ne bougent pas, leurs plumes s'agitent d'une manière plus ou moins apparente, mais efficace [1].

Cette question n'est pas très importante au point de vue de l'aviation, car l'imitation mécanique de phénomènes tels que les vibrations des plumes de l'aile ne paraît pas aisée à réaliser de manière utilement pratique.

1. Théorie d'Exner. Voir la note au bas de la page 31.

VOL RAMÉ. — Le vol ramé peut être considéré comme une combinaison du vol ornithoptère et du vol plané. La plus grande partie des ailes reste immobile comme dans le vol plané et fait cerf-volant, mais l'extrémité *rame* d'un mouvement régulier et alternatif, entretenant ainsi la vitesse de propulsion de l'oiseau et le maintenant, par cela même, à la même hauteur par un mécanisme que nous expliquerons tout à l'heure et dont le principe est précisément celui de l'aéroplane. Ce vol paraît celui des grands oiseaux migrateurs, en particulier des canards sauvages. Ce vol ramé peut être assimilé au vol *plané propulsé*, que réalise, par exemple, l'aéroplane. Dans un tel vol la propulsion et la sustentation sont dus, soit à deux organes différents (comme dans l'aéroplane), soit à deux parties différentes d'un même organe (l'aile de l'oiseau), soit à deux manières d'action différentes d'un organe.

VOL A LA VOILE. — Dans un air agité de remous, particulièrement aux abords des rochers ou des falaises battus par le vent, on observe souvent une variété fort intéressante de vol plané : les ailes, au lieu de rester immobiles, changent assez fréquemment de position, mais on a l'impression nette que le mouvement même de l'aile n'a qu'une faible action sur les déplacements de l'oiseau. C'est lorsqu'elle est immobile qu'elle agit et, si sa position change, c'est parce que la direction ou la vitesse du vent ont changé. L'analogie de ces manœuvres de l'oiseau avec la navigation à voiles est évidente ; mais il y a des

différences sur lesquelles nous reviendrons tout à l'heure.

Explication du vol.

Dans l'explication du vol des oiseaux, nous distinguerons trois cas essentiellement différents :

1° L'air est parfaitement immobile ou animé d'un mouvement de translation uniforme et horizontal. En d'autres termes, ou bien il n'y a aucun vent ou bien le vent est régulier et horizontal.

2° Le vent est régulier et ascendant.

3° Le vent est irrégulier.

REMARQUES GÉNÉRALES. — En premier lieu disons que, si les oiseaux peuvent voler, c'est parce que l'air leur fournit un point d'appui ; il oppose donc une résistance aux mouvements de leurs ailes, résistance non seulement utile, mais indispensable. La résistance de l'air ne s'exerce pas seulement sur les ailes en tant qu'organes propulseurs ; l'air tend à s'opposer à tout déplacement rapide de l'oiseau, de même qu'il tend à s'opposer aux déplacements rapides d'un cycliste ou d'une locomotive. La résistance de l'air joue donc deux rôles essentiellement différents dans le vol des oiseaux (et vis-à-vis des appareils d'aviation) : un rôle utile ou actif et un rôle nuisible ou passif.

Le rôle utile peut être subdivisé en deux : l'air sert de point d'appui pour la *propulsion* et

pour le *soutien*. Nous reviendrons dans la note I sur les lois de la résistance de l'air, lois très compliquées pour une surface de forme quelconque. A une première et grossière approximation, on a étudié d'abord les lois de la résistance au mouvement d'un plan mince : le fait essentiel résultant de cette étude est que la résistance de l'air peut être assez exactement représentée par une force *normale* au plan, c'est-à-dire une force dont la direction n'est pas, en général, celle

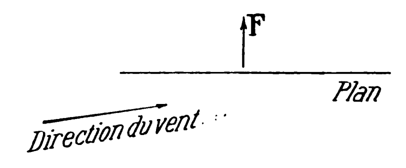


Fig. 1.

du vent. Ceci a lieu, même si la direction du vent fait un angle très faible avec le plan, comme sur la figure 1, où la résistance de l'air est représentée par la force F.

De plus, la résistance varie comme le carré de la vitesse, c'est-à-dire qu'à une vitesse double correspond une résistance quadruple.

Rappelons ici un autre principe auquel il est indispensable de songer bien qu'il ait une portée très générale qui dépasse le phénomène particulier : le principe de relativité, en vertu duquel la résistance est la même que l'air se déplace par rapport au solide ou le solide par rapport à l'air. En d'autres termes, ce qui importe uniquement, c'est la *vitesse relative* de l'air par rapport au

solide. Un cycliste marchant à une vitesse de 12 kilomètres à l'heure *contre* un vent dont la vitesse est également de 12 kilomètres à l'heure, éprouvera de la part de l'air, la même résistance que s'il se déplaçait à raison d'une vitesse de 24 kilomètres à l'heure en air calme, ou à raison de 30 kilomètres à l'heure avec, dans le dos, un vent de 6 kilomètres à l'heure. De même, si un bateau monte ou descend un fleuve, sa vitesse relative par rapport au courant est la même dans les deux cas si la force motrice est la même; sa vitesse par rapport aux rives ou vitesse absolue est égale à la somme ou à la différence de la vitesse relative et de la vitesse du courant.

Ce dernier exemple appelle deux remarques : le principe de la relativité est, bien entendu, toujours vrai, que le courant soit horizontal, ascendant ou descendant; mais, dans les applications, il faut tenir compte du travail dû à la descente ou à la montée de l'esquif; par suite, pour que le dernier résultat énoncé soit rigoureusement exact, il faut que la pente du fleuve soit assez faible pour que le travail nécessaire à l'ascension de la pente soit négligeable par rapport à celui qui est absorbé par la résistance de l'eau [1] ; c'est ce qui a lieu, en général, dans les fleuves navigables; mais c'est ce qui n'a pas lieu

1. Sinon, le travail dû à la résistance de l'eau reste bien le même, c'est-à-dire que le principe de relativité s'applique rigoureusement : mais il faut, en outre, pour évaluer la force motrice nécessaire au mouvement du navire, tenir compte du travail nécessaire pour remonter la pente (travail positif à la montée et négatif à la descente); il en résulte que la force motrice est plus grande à la montée, pour une même vitesse relative.

dans le cas des courants d'air ascendants ; c'est pourquoi il sera commode de les considérer à part au lieu de leur appliquer purement et simplement le principe de relativité. La seconde remarque est la suivante : dans une rivière assez étroite par rapport aux dimensions du bateau, les remous qui se produisent sur les rives ne sont pas les mêmes quand le bateau monte ou descend le courant avec la même vitesse relative par rapport à l'eau, car il n'a pas, comme nous l'avons vu, la même vitesse relative par rapport aux rives. Le principe de relativité ne peut donc s'appliquer complètement. Dans l'air, il en serait de même au voisinage du sol.

LE VOL EN AIR CALME. — Nous étudierons seulement trois types principaux de vol en air calme : la descente planée ; le vol orthoptère vertical ; le vol ramé horizontal. Ces trois espèces de vol correspondent aux trois cas : l'oiseau veut s'élever (vol orthoptère vertical), descendre (descente planée) ou se déplacer à un niveau constant (vol ramé).

LA DESCENTE PLANÉE. — Lorsque l'oiseau s'est élevé à une certaine hauteur au moyen du vol orthoptère vertical (ou du vol ornithoptère), il peut redescendre sans remuer les ailes et utiliser le travail produit par sa chute pour acquérir une certaine vitesse parallèle au sol ; cette vitesse lui permet d'atterrir en un point éloigné de son point de départ. Voici quel est le principe de cette *descente planée*.

Nous allons l'étudier dans le cas schématique où l'oiseau est réduit à un plan mince, rectangulaire : MNPQ, dont les côtés MQ et NP sont horizontaux. Nous prendrons pour plan de la figure un plan vertical passant par la ligne de plus grande pente AB de ce rectangle (fig. 2) et nous représenterons ce rectangle par cette section AB (fig. 3). Le centre de gravité O est sup-

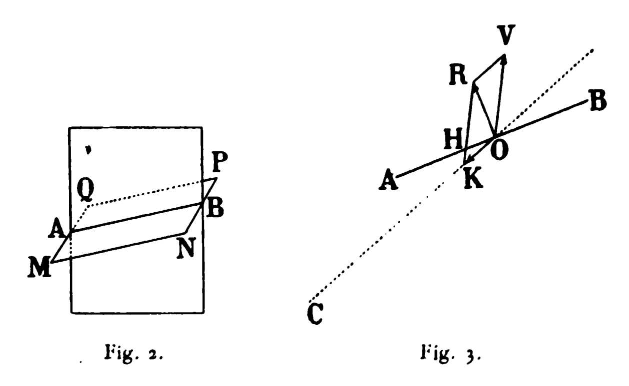


Fig. 2.

Fig. 3.

posé décrire la ligne inclinée OC, située dans ce même plan vertical et plus inclinée que AB. Nous allons montrer que si l'inclinaison de OC et celle de AB sont convenablement choisies, la descente suivant OC peut avoir lieu avec une vitesse uniforme.

La vitesse de AOB étant parallèle à OC, tout se passe, en vertu du principe de relativité, comme si AB était frappé par un vent dirigé suivant CO ; la résistance opposée au mouvement se traduit par une réaction OR, perpendiculaire à AB. Cette réaction peut être décompo-

sée en deux forces : l'une verticale OV que l'on aura dû chercher à rendre égale au poids de l'appareil ; elle annulera donc l'effet de ce poids ; l'autre OK, dirigée suivant OC, aura pour effet de combattre les résistances passives, c'est-à-dire les résistances opposées par l'air au mouvement des parties de l'oiseau qui ne sont pas confondues avec le plan mince AB et que nous avons négligées dans notre figure. Si cette force OK équilibre exactement ces résistances, tout se passera comme si l'oiseau n'était soumis à aucune force et il se déplacera bien suivant OC d'un mouvement uniforme. Qu'arrive-t-il quand la vitesse augmente ou diminue ?

Supposons que la vitesse augmente ; la résistance OR qui varie comme le carré de la vitesse augmentera donc ainsi que ses composantes OV et OK. Comme, d'autre part, les résistances passives augmentent aussi comme le carré de la vitesse, elles continueront à être équilibrées par OK, si elles l'étaient par hypothèse avant que la vitesse ait varié. Mais le poids n'a pas changé tandis que OV a augmenté ; il s'est donc développé une force verticale dont le résultat sera de relever la trajectoire, c'est-à-dire de diminuer l'angle de OC avec AB ; le vol devient plus *fin ;* en d'autres termes, l'angle de l'aile avec la direction de ce vol devient plus petit ; la résistance opposée à l'aile diminue de ce fait, ce qui peut compenser l'augmentation de résistance due à l'augmentation de vitesse. Si l'angle de OC avec AB devenait nul, OK se confondrait avec OH (fig. 3) ; en général OK est supérieur à OH.

S'il n'y avait pas de résistances passives, on arriverait à ce résultat paradoxal que la vitesse pourrait augmenter indéfiniment à condition que le vol devienne assez fin, ou, comme l'on dit, que l'angle d'attaque soit assez petit. De sorte qu'un oiseau, arrivé à une certaine hauteur, pourrait descendre d'autant plus vite qu'il descendrait suivant une pente moins inclinée. En réalité, il n'en est rien, car les résistances passives augmentent très rapidement avec la vitesse et, d'autre part, la composante OK qui leur est opposée diminue lorsque l'angle d'attaque et l'inclinaison OC diminuent eux-mêmes[1].

VOL ORTHOPTÈRE VERTICAL. — L'oiseau abaisse et relève alternativement les ailes d'un mouvement de va-et-vient. Lorsque l'aile s'abaisse, la résistance de l'air se traduit par une poussée verticale, dirigée de bas en haut et ayant pour effet d'élever l'oiseau. Lorsque l'aile se relève, il se produit une poussée en sens inverse ayant par suite l'effet de précipiter l'oiseau vers le sol. Comme, d'autre part, la pesanteur tend

1. Ces explications ne rendent pas compte du cas où le vol plané serait horizontal. Certains naturalistes pensent que c'est par des *vibrations* des plumes qui garnissent les ailes que l'oiseau peut, dans certains cas où ses ailes paraissent immobiles, développer néanmoins une force propulsive appréciable. Exner a soumis cette théorie au contrôle de l'expérience (voir Lapicque, *Revue du Mois*, 10 août 1908). Mais il s'en faut que la question soit élucidée. Elle appelle des recherches nouvelles. L'imitation mécanique de ces vibrations propulsives ne paraît pas avoir été tentée.

D'autre part, il semble certain, au moins dans certains cas, que la force propulsive est due à un mouvement spécial de [illegible] des extrémités des ailes.

aussi à ramener l'oiseau vers le sol, il est nécessaire que la poussée ascendante ou utile soit plus importante que la poussée descendante ou nuisible. Ce résultat est obtenu grâce à deux circonstances agissant dans le même sens :

1° L'aile est concave vers le bas et l'expérience prouve que la résistance de l'air est beaucoup plus grande pour une surface concave que pour une surface convexe ; l'air s'oppose donc moins au relèvement de l'aile qu'à son abaissement : l'oiseau accentue d'ailleurs encore cette différence en modifiant, lorsqu'il élève son aile, la position des plumes, de telle manière, que la résistance de l'air soit diminuée comme l'est la poussée, égale et opposée à la résistance. La poussée utile est supérieure, par conséquent, à la poussée nuisible.

2° Le mouvement de l'aile est plus rapide pendant qu'elle s'abaisse ; s'il était deux fois plus rapide, cela suffirait, indépendamment de la forme concave, pour que la résistance soit quatre fois plus grande ; l'effet nuisible au moment où l'aile remonte, absorberait donc seulement le quart du travail dépensé pendant que l'aile s'abaisse ; les trois quarts restant utilement employés [1].

L'observation des oiseaux montre, comme il a été dit précédemment, que le vol orthoptère des oiseaux est très fatigant pour eux ; son imitation mécanique exigerait, indépendamment des conditions de stabilité, une dépense de force

1. Pour plus de détails sur ce point, voir les calculs de la page 140.

beaucoup plus grande que le vol par aéroplane, à moins que l'on ne réalise des surfaces portantes considérables, animées de mouvements alternatifs, ce qui paraît être d'une réalisation mécanique difficile.

L'avantage principal du vol orthoptère, c'est de ne pas exiger de *lancement*. Cet avantage n'est peut-être pas suffisant pour compenser les inconvénients qui viennent d'être indiqués.

VOL RAMÉ. — La combinaison du vol orthoptère et de la descente planée est utilisée, avec des nuances, par les oiseaux qui volent peu et

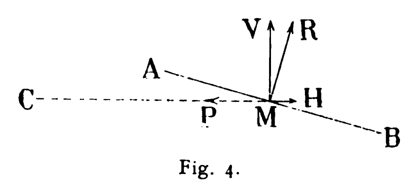


Fig. 4.

qui passent fréquemment de l'un à l'autre de ces modes de vol. Les oiseaux qui parcourent de grandes distances recourent plus volontiers au vol ramé, sur lequel nous allons insister un peu, car c'est celui dont l'aéroplane se rapproche le plus.

Nous admettrons comme un fait d'observation, sans entrer dans des détails, que l'oiseau développe avec une partie de ses ailes ou de sa queue, une force propulsive horizontale. Ce point étant admis, représentons (fig. 4) l'aile AB légèrement inclinée sur le trajet horizontal MC; la résistance de l'air au mouvement de AMB suivant MC est

 PAINLEVÉ et BOREL. — 3

dirigée suivant la normale MR à AB et se décompose en une force verticale MV qui équilibre le poids et une force horizontale MH qui sera retardatrice du mouvement. La force propulsive horizontale MP devra être supérieure à MH, les différences étant employées à vaincre les résistances passives, c'est-à-dire la résistance opposée par l'air aux portions autres que AB du corps de l'oiseau.

On voit que *la sustentation est obtenue grâce à la vitesse ;* c'est là le principe fondamental que nous retrouverons dans l'aéroplane. La vitesse doit être telle que la composante verticale MV de la réaction MR équilibre précisément le poids de l'oiseau ; l'angle VMR étant pratiquement très petit, MV ne diffère pas sensiblement de MR ; d'autre part, MR dépend à la fois de la vitesse et de l'angle d'attaque. Nous reviendrons sur le détail du calcul à propos de l'aéroplane.

Le vol par un vent régulier.

LE CAS DU VENT RÉGULIER HORIZONTAL EST LE MÊME QUE CELUI DE L'AIR CALME. — Lorsque le vent est horizontal et régulier, *quelle que soit sa vitesse*, tout se passe comme si l'air était calme, à condition que l'on étudie, non pas la vitesse absolue par rapport à la terre, mais la vitesse relative par rapport à l'air, c'est-à-dire la vitesse qu'observerait un aéronaute situé dans la nacelle d'un ballon sphérique emporté par le vent. On sait qu'un tel aéronaute ne s'aperçoit

pas qu'il y a du vent, quelle que soit sa violence, si le vent est régulier et s'il passe au-dessus des nuages, entouré d'autres ballons emportés comme lui par le vent. La seule restriction à faire à ce principe de relativité concerne le départ du sol et l'atterrissage qui peuvent être facilités ou rendus plus difficiles par le vent; il y a, par exemple, grand avantage à partir face au vent; mais sitôt que l'oiseau, ou l'aéroplane, ou le ballon se trouvent dans l'air, c'est uniquement leur mouvement par rapport à l'air qui doit être étudié et cette étude se fait exactement de la même manière que l'air soit immobile ou animé d'un mouvement de translation horizontal uniforme. Pour avoir ensuite le mouvement par rapport au sol, il faut composer les vitesses d'après la règle du parallélogramme.

Le simple bon sens montre sans qu'il soit nécessaire de recourir à un raisonnement géométrique classique, que si sa vitesse est supérieure à celle du vent, l'oiseau peut se déplacer suivant une direction quelconque par rapport au sol; il n'en est évidemment pas de même lorsque sa vitesse propre est inférieure à celle du vent : ne pouvant lutter contre le vent, il se trouve forcément entraîné.

Il se présente dans le calcul des vitesses lorsqu'il y a du vent, une petite difficulté qu'il est bon de mettre en évidence. Imaginons qu'un oiseau se déplace avec une vitesse propre de 30 kilomètres à l'heure dans un vent de 10 kilomètres à l'heure; il va d'abord dans la même direction que le vent, puis revient à son point de

départ en volant contre le vent. A l'aller, sa vitesse par rapport au sol est égale à sa vitesse propre augmentée de la vitesse du vent, c'est-à-dire à 40 kilomètres à l'heure. Au retour, sa vitesse est égale à la différence, c'est-à-dire à 20 kilomètres. Ce serait une erreur grave de conclure que sa vitesse moyenne pendant le trajet aller et retour est de 30 kilomètres à l'heure.

Supposons que la distance des deux extrémités de ce trajet soit de 20 kilomètres, il parcourt en tout 40 kilomètres et met pour cela une demi-heure à l'aller (20 kilomètres à une vitesse de 40 à l'heure) et une heure au retour (20 kilomètres à une vitesse de 20 à l'heure), soit en tout une heure et demie. Parcourant 40 kilomètres aller et retour en une heure et demie, sa vitesse moyenne est donc 26 kilomètres 666, et non pas 30 kilomètres. La diminution de la vitesse moyenne est due à ce que le trajet prend un temps plus long quand la vitesse est plus faible ; l'influence retardatrice du vent se fait donc sentir plus longtemps que son influence accélératrice. Un peu de réflexion suffit à convaincre de la généralité du fait. Si un oiseau ou un appareil d'aviation décrit un circuit fermé, l'effet d'un vent régulier est de diminuer la vitesse moyenne par rapport au sol. Dans les concours d'aviation où quelques secondes gagnées sur un trajet suffisent à rapporter une coupe, ce n'est pas nécessairement le meilleur appareil qui gagne, mais celui dont le pilote a su choisir pour concourir un air parfaitement calme.

LE VOL RAMÉ PAR UN VENT ASCENDANT RÉGULIER. — Il est évident que le cas d'un vent ascendant régulier ne peut être réalisé avec permanence dans un lieu étendu. Néanmoins son étude présente un réel intérêt; dans certaines conditions, un tel vent peut être à la fois sustentateur et propulseur sans que l'oiseau ait à faire aucun effort, pourvu qu'il sache disposer ses ailes de

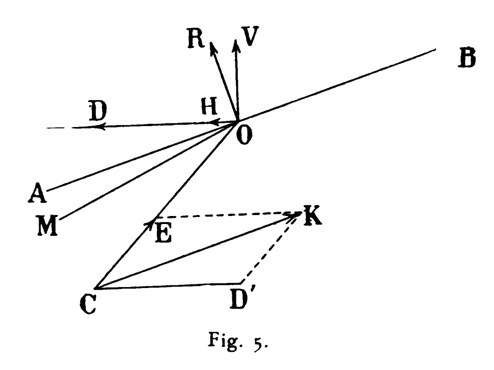


Fig. 5.

façon convenable pour emprunter au vent l'énergie nécessaire à le maintenir en l'air et même à l'élever, et aussi pour vaincre la résistance que l'air oppose à son déplacement horizontal. Figurons en AB l'aile représentée schématiquement comme plane (fig. 5).

Supposons d'abord l'oiseau immobile et soit CE la vitesse du vent (voir fig. 5, en faisant pour l'instant abstraction des points D, D', K, M); l'action du vent sur les ailes sera une force OR, normale à AB, que nous décomposons en une force verticale OV et une force horizontale

OH. Si la force verticale OV est égale au poids de l'oiseau, elle s'opposera à sa chute et la sustentation se trouvera réalisée. Quant à la force OH, si l'aile AB est très peu inclinée sur l'horizon, elle sera très faible, comme l'indique la figure (elle pourrait même être nulle si AB était horizontal) et pourra ne pas produire un déplacement sensible : l'oiseau peut ainsi rester à peu près immobile.

Supposons maintenant que la force horizontale OH soit suffisante pour entraîner un déplacement horizontal de l'oiseau ; sa vitesse sera dirigée dans le même sens que OH ; nous la représentons en OD, et remarquons qu'elle est de sens opposé à celui du vent (ou du moins à la projection horizontale du vent) ; cette vitesse propre de l'oiseau aura pour conséquence de modifier le *vent relatif*, c'est-à-dire la direction du vent par rapport à l'oiseau. Précisons ce point. Nous avons figuré en OD la vitesse horizontale de l'oiseau et CE la vitesse du vent ; la vitesse relative du vent s'obtient par la règle du parallélogramme : CD' étant parallèle et opposé à OD, on construit le parallélogramme CD'KE ; la vitesse relative du vent est CK ou MO parallèle et égal à CK. Il importe que l'aile AB soit comprise dans l'angle DOM, de manière que *le vent relatif* MO la prenne en dessous, il ne suffit pas que *le vent absolu* CO soit en dessous ; on remarquera que plus la vitesse OD est considérable, plus l'angle DOM est petit, et par suite plus l'angle d'attaque AOM est petit, l'oiseau doit voler plus finement. Par contre, le vent relatif OM augmente en même

temps que OD et la réaction OR qu'il produit peut rester notable malgré la diminution de l'angle d'attaque, surtout si l'aile est concave et non pas plane[1]. Cette force OR normale à AB sera encore décomposée en une force verticale OV dirigée vers le haut et équilibrant le poids et en une force propulsive OH qui augmente la vitesse horizontale jusqu'au moment où elle est exactement équilibrée par les résistances passives opposées par l'air aux parties de l'oiseau autres que l'aile[2].

Remarquons qu'en volant *contre le vent*, le vent relatif se trouve augmenté et par suite la poussée sustentatrice. Si l'on cherchait à voler *dans le vent*, le vent relatif serait diminué et deviendrait très faible si l'on atteignait une vitesse voisine de celle du vent et, par suite, la force sustentatrice ferait défaut et il y aurait chute. Ce n'est que par un vent extrêmement violent qu'un oiseau pourrait pratiquer le vol plané en se déplaçant vite dans le sens du vent, car, alors, il pourrait avoir une vitesse notable bien que sensiblement inférieure à celle du vent. Au contraire, contre le vent, la vitesse peut aisément

1. Voir la note I. Sans entrer ici dans le détail des calculs, observons que la réaction est proportionnelle au carré de la vitesse et au simple sinus de l'angle d'attaque. L'augmentation de la vitesse a donc une influence plus grande que la diminution de l'angle d'attaque.

2. On réserve habituellement le nom de *traînée* à la projection de la réaction totale OR sur la direction de la vitesse relative et celui de *poussée* à la projection de OR sur la normale à la vitesse relative dans leur plan. Dans le cas où la vitesse relative est horizontale, la *poussée* est verticale et équilibre le poids de l'oiseau (ou de l'appareil d'aviation).

atteindre et même dépasser celle du vent, du moment que le vent est ascendant. Nous avons négligé dans cette discussion la question de stabilité ; prenant les choses à ce point de vue on verrait qu'il y a également avantage à voler contre le vent.

Des remarques analogues peuvent être faites pour la navigation à voiles, mais elles restent sans utilité pratique à cause de l'importance considérable des résistances passives. Théoriquement, si l'on pouvait arriver à diminuer considérablement ces résistances, on pourrait aller beaucoup plus vite *contre le vent* que *dans le vent*[1] ; car, dans le vent, la vitesse devrait rester toujours inférieure à celle du vent. Il est à peine besoin d'ajouter que l'importance des résistances passives modifie entièrement ces conclusions : on navigue moins vite contre le vent que dans le vent.

Le vol par un vent irrégulier.

L'étude de ce cas présente de grandes difficultés. Il ne suffit pas d'observer les oiseaux et des photographies ou cinématographies de leurs

1. La question mériterait une étude assez délicate à cause de la nécessité de ne tenir compte, ici aussi, que du vent relatif : on peut dire qu'elle est assez analogue à celle que nous venons de traiter, à condition d'interpréter la figure précédente comme une projection horizontale et non verticale ; la ligne A B serait la voile du bateau qui suit la route O D ; la poussée O R du vent relatif M O sur cette voile se décompose en une force propulsive O H et en une force déviatrice O V qui doit être annulée par la quille et le gouvernail (d'où des frottements considérables) ; on peut ainsi naviguer vers le N par exemple avec un vent soufflant du N-O, mais les frottements diminuent pratiquement beaucoup la vitesse.

mouvements[1]; ce qu'il faudrait pour que l'observation soit complète et efficace, ce serait connaître à chaque instant la direction et la vitesse du vent au point précis occupé par l'oiseau à cet instant même. Le procédé le plus simple consiste à observer, en même temps que les oiseaux, des objets inertes emportés par le vent, comme des feuilles mortes. Ces points de repère permettent à un observateur attentif d'obtenir quelques conclusions intéressantes ; mais il y aurait beaucoup à faire pour donner à ce procédé la rigueur que l'on doit souhaiter dans les expériences scientifiques ; il serait nécessaire d'avoir, dans la région de l'air où l'on observe les oiseaux, des points de repère artificiels, les uns fixes et les autres mobiles, faisant connaître avec précision et exactitude, la direction du vent et aussi sa vitesse. De semblables recherches, tout à la fois expérimentales et d'observation, seraient longues et difficiles ; elles ne paraissent cependant pas présenter des difficultés insurmontables et la question vaudrait qu'on s'en occupe.

Dans le voisinage des falaises ou de rochers surplombant une plaine, il existe parfois un régime relativement permanent de vents irréguliers ; en d'autres termes, la direction et la vitesse du vent varient beaucoup entre deux

1. Observons en passant que c'est pour étudier le vol des oiseaux que Marey a imaginé les méthodes de photographies instantanées à courts intervalles qui, transportées du laboratoire dans l'industrie, ont donné le cinématographe. On sait d'ailleurs que l'utilisation industrielle pratique d'une méthode de laboratoire est souvent un pas difficile à franchir.

points voisins, mais, en un même point, restent sensiblement pareilles à chaque instant. De tels endroits, souvent fréquentés par les oiseaux, sont de précieux observatoires. Nous avons ainsi pu voir de très intéressants vols de corbeaux dans un cirque du causse Larzac. Le plateau sensiblement horizontal se termine brusquement à une sorte de falaise présentant fréquemment des à pics d'une centaine de mètres, dévalant ensuite

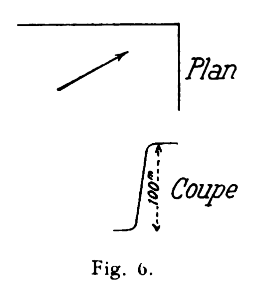


Fig. 6.

en pente plus douce. Les corbeaux étaient fort nombreux en un point de la falaise où la découpure du plateau est sensiblement en angle droit. Le vent soufflant dans la vallée avec une direction régulière, indiquée par la flèche (fig. 6), venait se briser contre les hautes murailles verticales, en produisant des courants d'air ascendants, ainsi que des tourbillons et remous. Les corbeaux donnaient l'impression d'une véritable acrobatie en variant constamment la disposition de leurs ailes, tantôt horizontales, puis, la seconde d'après, verticales. De telles observations montrent nettement quelle importance a pour l'oiseau la direc-

tion du vent, lorsqu'il est violent et variable. Pour le terrien, il existe une direction privilégiée, celle de la pesanteur ; pour le marin, soustrait à la pesanteur, c'est la direction du vent qui est la direction fondamentale à laquelle il rapporte en son langage les relations de situation ; pour l'oiseau, les deux directions sont également importantes.

Il n'est pas vraisemblable que l'homme arrive de longtemps à acquérir la souplesse instinctive avec laquelle l'oiseau *sent* à chaque instant le vent et modifie en conséquence la disposition de sa voilure. Pourra-t-il créer des mécanismes ayant la sensibilité qu'il n'a pas lui-même et exécutant automatiquement les manœuvres nécessitées par le vent ? C'est sans doute moins impossible que la création chez l'homme d'une sensibilité spéciale et de réflexes nouveaux, mais ce n'est pas d'une réalisation prochaine.

L'UTILISATION DES PULSATIONS PÉRIODIQUES. — Laissant de côté les vents très irréguliers dont nous venons de parler et dont l'irrégularité est due aux accidents de terrain, on peut se borner à considérer les régions de l'atmosphère assez élevées pour que les irrégularités du terrain soient négligeables. Dans les pays de vastes plaines, il suffit peut-être pour cela de s'élever à une centaine de mètres ; dans les régions très montagneuses, on ne peut fixer de limites précises.

Les observations sur le vent à une certaine altitude sont difficiles et, par conséquent, peu nombreuses. Un observatoire comme celui de la

tour Eiffel est à peu près unique à ce point de vue. Il semble néanmoins que l'on puisse tirer quelque certitude de la concordance entre les observations peu nombreuses, les considérations théoriques et aussi les observations faites en pleine mer, à une faible altitude bien évidemment, mais à l'abri des perturbations dues au sol. La conclusion à laquelle on est conduit est que le vent a souvent des pulsations périodiques assez régulières, assimilables grossièrement au mouvement des vagues de la mer. Si l'on admet l'existence de telles pulsations comme régime régulier pendant un temps assez long dans une région assez étendue, la question se pose de savoir si l'on peut en tirer parti pour le vol. La réponse affirmative n'est pas douteuse au point de vue théorique. Nous n'entrerons pas dans le détail des calculs qui le prouveraient, car ces calculs paraissent encore bien éloignés de l'utilisation pratique. Une question plus intéressante que cette réponse théorique serait de savoir si les oiseaux utilisent effectivement ces pulsations. Ce serait là une explication plausible du vol plané accompli sans effort apparent pendant un temps très long. Mais, pour que cette explication fût acceptable, il faudrait, à défaut d'expériences décisives difficiles à faire, prouver que l'énergie qu'il est possible d'emprunter aux pulsations de l'air est effectivement suffisante.

Jusqu'à ce que cette preuve ait été faite, l'existence théorique certaine de cette énergie ne suffit pas pour permettre d'affirmer la possibilité du *vol à la voile*, c'est-à-dire la possibilité de voler

sans dépenser d'autre force que le très léger effort nécessaire pour modifier de temps en temps la disposition des ailes, de même que le navigateur à la voile modifie de temps en temps la disposition de sa voilure, mais ne dépense aucun effort pour propulser son bateau. Dans l'étude de cette question, il y aurait lieu de tenir compte, non seulement des inégalités de vitesse du vent, mais aussi des inégalités de direction, soit dans le sens horizontal, soit dans le sens vertical. Les oiseaux paraissent utiliser très bien ces divers phénomènes, qui sont encore très mal connus ; leur étude expérimentale présente de grandes difficultés, mais son importance serait assez grande pour qu'elle doive être tentée malgré ces difficultés.



CHAPITRE II

LES ORTHOPTÈRES ET LES HÉLICOPTÈRES

On sait que l'aéroplane est, à l'heure actuelle, l'appareil d'aviation qui a donné, à beaucoup près, les meilleurs résultats. Avant de l'étudier, il nous paraît bon de passer brièvement en revue les appareils basés sur un principe différent, afin, d'une part, de nous mieux rendre compte des raisons de la supériorité de l'aéroplane et, d'autre part, de ne pas négliger des types dont on ne saurait affirmer qu'ils seront toujours inutilisables. Le succès des ballons a, trop longtemps, fait négliger l'aviation ; le succès de l'aéroplane ne doit pas faire négliger ses rivaux, malgré les raisons, actuellement excellentes, de les regarder comme inférieurs.

Le principe de l'orthoptère.

A défaut d'appareil orthoptère ayant, sinon fait ses preuves, du moins donné lieu à des essais sérieux, nous nous bornerons à étudier les conditions mécaniques générales d'un appareil orthoptère schématique, conçu en grandes lignes sur le plan de l'oiseau. Soit A le corps de l'appa-

reil, auquel sont adjointes deux ailes symétriques B et C, susceptibles de se relever en B' et C', pour s'abaisser ensuite de nouveau.

Nous supposerons, pour nous placer dans le cas le plus favorable, qu'un dispositif convenable supprime toute résistance de l'air lorsque les ailes se relèvent [1] ; un tel résultat est partiellement atteint par les oiseaux au moyen d'un déplace-

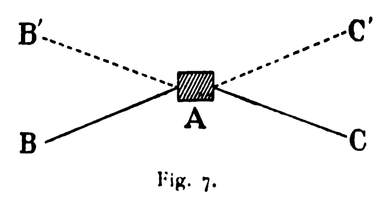


Fig. 7.

ment convenable des plumes ; on a cherché à le réaliser mécaniquement, au moyen d'ailes ayant une disposition analogue à celle des persiennes ; les essais faits jusqu'ici n'ont encore abouti à rien de pratique.

Si l'on suppose que l'aile met le même temps pour s'abaisser et pour se relever, on peut simplifier la théorie en admettant qu'il y a deux paires d'ailes dont l'une s'abaisse pendant que l'autre se relève, de sorte que la sustentation est

1. Nous étudions plus loin (p. 140) l'hypothèse moins avantageuse mais peut-être plus facile à réaliser pratiquement, où l'on tient compte de la résistance de l'air au relèvement de l'aile ; nous verrons qu'en supposant le mouvement de descente très rapide et le mouvement de relèvement plus lent, un appareil de poids donné peut voler avec des ailes de dimensions quelconques : mais la puissance nécessaire croît lorsque la dimension des ailes décroît, ce qui diminue notablement l'intérêt de ce résultat théorique.

continue au lieu d'être *discontinue*. Cette hypothèse de la sustentation continue est, on le conçoit aisément, favorable en ce sens qu'un travail régulier est toujours plus économique ou, tout au moins, aussi économique qu'un travail irrégulier [1].

Supposant donc la sustentation continue, désignons par S la surface des ailes qui la réalisent, par V la vitesse avec laquelle elles frappent l'air, vitesse que nous supposons constante pour la raison qui vient d'être donnée. Si nous nous plaçons dans l'hypothèse où l'appareil fonctionne comme orthoptère, c'est-à-dire où l'attaque de l'air par les ailes est normale à ces ailes, nous aurons pour la valeur de la poussée P la formule

$$P = kSV^2$$

en désignant par k le coefficient de la résistance de l'air [2]. Cette poussée P doit être égale au poids de l'appareil, si celui-ci doit être maintenu immobile sans s'élever ni s'abaisser ; nous devons donc la regarder comme une donnée du problème.

Quel sera le travail nécessaire à la sustentation par unité de temps ? On sait que le travail s'obtient en multipliant la force par le déplacement, lorsque ce déplacement a lieu dans la direction de la force. C'est ici le cas, puisque la

1. On se rendra compte d'une manière précise de ce fait par un calcul tout à fait analogue à celui auquel nous venons de renvoyer.

2. Rappelons que k est égal sensiblement à 0,08 pour une surface plane si l'on exprime V en mètres par seconde, S en mètres carrés et P en kilogrammes-poids.

force est verticale et que les ailes s'écartent peu de la position horizontale : leur déplacement est donc sensiblement vertical. Le travail par seconde est donc PV puisque le déplacement par seconde est précisément égal à la vitesse V. On peut tirer de l'équation donnant P la valeur de V en fonction de P ; on a

$$V = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{kS}}$$

et l'on en conclut pour le travail $\mathfrak{T}$ l'expression

$$\mathfrak{T} = \frac{P\sqrt{P}}{\sqrt{kS}}$$

dans laquelle ne figurent plus que des quantités dépendant de l'appareil donné.

Si l'on suppose, par exemple, que P soit égal à 500 kilogrammes et S à 50 mètres carrés, ce qui sont des valeurs numériques sensiblement analogues à celles des aéroplanes, et, si l'on prend, pour abréger, $k = 0,1$, on trouve

$$\mathfrak{T} = \frac{500\sqrt{500}}{\sqrt{5}} = 5\,000$$

Le travail est donc, vu les unités choisies, de 5.000 kilogrammètres par seconde, ce qui correspond à une puissance d'environ 67 chevaux-vapeur.

Or, on doit observer : 1° que nous avons négligé toutes les causes de résistance passive ; 2° que les simplifications faites ont pour résultat de *diminuer* le travail (car, en réalité, la sustentation ne peut jamais être parfaitement régulière) ;

3° que nous avons laissé de côté la question de la stabilisation qui entraîne forcément des résistances supplémentaires ; 4° que nous ne nous sommes proposés que de voler à une hauteur constante, en restant immobile et qu'une puissance supplémentaire serait nécessaire pour s'élever et se propulser. Dans ces conditions, la puissance de 67 chevaux que nous avons obtenue par le calcul approché devrait être sans doute plus que doublée, c'est-à-dire portée à 150 chevaux pour un orthoptère du poids total de 500 kilogrammes. C'est évidemment un résultat assez peu encourageant surtout si on le compare à ce que nous obtiendrons pour les aéroplanes ; il est essentiel de remarquer que cette puissance pourrait être très notablement diminuée par une amélioration de la *qualité* des surfaces sustentatrices, c'est-à-dire par l'imitation des formes incurvées de l'aile de l'oiseau [1]. La difficulté mécanique du vol orthoptère réside donc surtout dans le fait que le mouvement alternatif est bien plus malaisé à réaliser que le mouvement circulaire continu, et aussi dans le soin très grand qu'exigerait la construction d'ailes mobiles d'une grande surface et d'un poids relativement faible, pouvant subir de fortes pressions sans se déformer. Si ces difficultés techniques étaient résolues, le résultat que nous avons obtenu pour la

1. Si le coefficient k pouvait être rendu neuf fois plus grand, ce qui ne paraît nullement impossible (0,7 au lieu de 0,08) par l'emploi d'ailes convenables, la puissance serait divisée par trois, c'est-à-dire deviendrait 50 chevaux, tout à fait du même ordre que la puissance du moteur d'un aéroplane de même poids.

puissance ne semble pas interdire tout espoir de réalisation du vol orthoptère.

Le principal avantage de ce mode de vol (qu'on pourrait d'ailleurs combiner dans un même appareil avec le vol plané) est la possibilité de s'élever sur place et de se mouvoir, si on le désire, avec une faible vitesse horizontale. Nous n'y insisterons pas plus longtemps, les expériences indispensables à l'établissement d'une théorie plus précise faisant à peu près entièrement défaut.

L'ornithoptère.

Lorsque l'orthoptère est propulsé au lieu de s'élever verticalement sur place, il devient ornithoptère, c'est-à-dire que les ailes attaquent l'air obliquement et non plus normalement. Il importe de bien comprendre ce point. Supposons que par la portière d'un wagon immobile, nous agitions de haut en bas un morceau de carton : nous frappons l'air normalement ; si le wagon se met en marche et si nous agitons de la même manière le morceau de carton, il sera frappé par l'air obliquement, par suite du mouvement du train. On se rend encore mieux compte de ce fait en supposant le carton immobile et la pluie tombant verticalement dans un air calme. Lorsque le wagon est immobile, les gouttes de pluie frappent normalement le carton ; lorsque le train est en marche, elles le frappent obliquement. La théorie des ornithoptères se rattache ainsi à l'attaque *oblique* des filets d'air dont nous parlerons

avec quelque détail à propos des aéroplanes; c'est seulement après nous être rendus compte des lois de la résistance de l'air dans le cas de l'attaque oblique que nous pourrons comprendre quels avantages considérables présente cette attaque oblique. Nous renvoyons donc au chapitre V quelques développements relatifs aux ornithoptères, dont l'intérêt est d'ailleurs fortement diminué par le fait qu'ils ne sauraient s'appliquer à aucun appareil précis, puisqu'il n'existe pas d'ornithoptère mécanique de grande dimension ayant fait ses preuves[1].

Les lois de l'attaque oblique des filets d'air interviennent aussi dans la théorie de l'hélice, organe essentiel des hélicoptères des aéroplanes (et aussi des dirigeables). Mais on peut se dispenser de les utiliser en regardant l'effet de l'hélice dans son ensemble comme une donnée expérimentale ; cette manière de procéder est d'autant mieux justifiée que la théorie aérodynamique de l'hélice est encore à faire[2].

1. Parmi les appareils de petite dimension, il importe de signaler l'*oiseau artificiel* de Pénaud. Pour les appareils de grande dimension on peut citer l'ornithoptère de la Hault et aussi quelques essais d'ornithoptères à persiennes. Mais aucun de ces essais n'a donné de résultats très encourageants ; il semble bien qu'une idée vraiment nouvelle soit indispensable pour que l'ornithoptère soit rendu pratique.

2. Il n'est évidemment pas légitime d'admettre, comme l'ont fait certains auteurs, que l'effet total de l'hélice sur l'air s'obtient en composant les effets partiels des éléments de surface, chaque élément étant considéré comme s'il était seul : le mouvement général communiqué par l'hélice à l'air dans lequel elle agit modifie évidemment la résistance opposée par cet air à chaque élément de surface.

Les hélicoptères.

Voici enfin des appareils dont la réalisation mécanique a cessé d'être hypothétique ; si les hélicoptères n'ont pas atteint, même de loin, les résultats pratiques des aéroplanes, il en a été construit un assez grand nombre, de types variés, dont certains ont donné lieu à des résultats intéressants.

Le principe de l'hélicoptère consiste à obtenir la sustentation au moyen d'une hélice d'axe vertical. Il est donc nécessaire que nous donnions tout d'abord quelques détails sur les hélices aériennes, détails d'ailleurs indispensables aussi pour l'étude de l'aéroplane.

LES HÉLICES AÉRIENNES. — On sait que la propriété géométrique essentielle de la courbe appelée hélice est de pouvoir rester en coïncidence avec elle-même tout en se déplaçant d'un double mouvement de rotation et d'avancement ; l'image la plus commune de ce mouvement *hélicoïdal* est le mouvement de la vis dans son écrou, ou d'un vulgaire tire-bouchon quand on l'enfonce dans le bouchon ; c'est en réalisant le mouvement de rotation que le mouvement d'avancement se produit de lui-même d'après la propriété fondamentale de l'hélice. Nous venons de dire que les géomètres donnent le nom d'hélice à une courbe. Cette courbe est figurée, par exemple, par l'arête extérieure d'un tire-bouchon ou d'une vis; la surface qui limite le tire-bouchon ou la vis renferme plu-

sieurs courbes analogues, dont chacune peut être regardée comme décrite par un point déterminé de cette surface, lorsqu'on enfonce la vis dans un écrou immobile ou, si l'on préfère, comme tracée sur la vis immobile par un point de l'écrou mobile, point que l'on aurait pu matérialiser en y plaçant une pointe très fine qui tracerait l'hélice sur la vis. La surface ainsi constituée par un ensemble d'hélices entraînées dans un même mouvement, s'appelle surface hélicoïdale ; pour que des hélices assemblées constituent une surface hélicoïdale, il faut qu'elles aient *même axe* et *même pas*. L'*axe* de l'hélice est la droite autour de laquelle elle tourne dans son mouvement naturel ; son avancement se produit aussi dans la direction de cette droite ; le *pas* de l'hélice est la longueur dont elle avance après un tour complet. Cet axe et ce pas sont dit respectivement l'axe et le pas de la surface hélicoïdale formée par les hélices.

On donne en mécanique le nom d'*hélices* à certaines surfaces hélicoïdales utilisées pour la propulsion des navires et, aussi, plus récemment, pour la propulsion ou la sustentation des ballons et des appareils d'aviation. Nous emploierons désormais le mot *hélice* dans ce sens mécanique et non plus dans le sens géométrique qu'il était cependant nécessaire de rappeler, vu la liaison étroite entre ces deux sens. Une hélice se compose donc d'une portion de surface hélicoïdale ; cette portion correspond généralement à une petite fraction du pas ; de plus, on considère quelquefois des hélices *à pas variable*, formées

en quelque sorte par la juxtaposition de surfaces hélicoïdales de même axe, mais dont le pas varie.

Le fonctionnement de l'hélice est grossièrement analogue à celui du tire-bouchon ; on imprime un mouvement de rotation très rapide à l'axe de l'hélice et celle-ci *se visse* dans le liquide comme le tire-bouchon dans le liège. On conçoit, en effet, que la résistance opposée par le liquide au mouvement de l'hélice ait pour résultat, suivant une loi mécanique fort générale, de discipliner ce mouvement de telle manière que la résistance soit aussi faible que possible, ce qui a précisément lieu lorsque diverses portions de l'hélice se déplacent dans le même sillage, comme le font les portions successives d'un tire-bouchon.

En réalité, si elle permet de se rendre compte de la nature du phénomène, cette théorie ne doit être regardée que comme une indication qui demande à être corrigée et mise au point.

Tout d'abord, l'expérience met en évidence deux faits essentiels : 1° Il se produit sous l'action de l'hélice des mouvements tourbillonnaires très compliqués dans le fluide ; ces mouvements ont été observés par tous ceux qui se sont tenus quelque temps à l'arrière d'un bateau à vapeur. 2° L'avancement réel produit par l'hélice est toujours inférieur à l'avancement théorique. Pour un tour complet de l'hélice, on avance d'une longueur inférieure au pas ; la différence entre cette longueur que l'on pourrait nommer, si elle était constante, le *pas expérimental*, et le *pas*

géométrique, porte le nom de *recul* de l'hélice[1].

Le recul de l'hélice a évidemment pour conséquence d'augmenter l'agitation produite par le mouvement de l'hélice dans le fluide et, par suite, la puissance dépensée en pure perte ; le rendement utile du moteur est ainsi diminué. Il est cependant un cas qu'il faut mentionner spécialement : c'est celui des essais au point fixe. Pour comparer diverses hélices entre elles et étudier leur fonctionnement, on peut attacher l'axe (ou *arbre*) de l'hélice à un ressort puissant, solidement fixé lui-même à un robuste bâti. L'arbre ne peut ainsi se déplacer ; la tendance qu'il a à glisser sur lui-même par suite de la rotation de l'hélice a pour unique résultat de tendre le ressort. Cette tension peut être évaluée en kilogrammes[2] ; elle est, par définition, la poussée de l'hélice dans l'essai au point fixe. De tels essais peuvent être utiles, nous l'avons dit, pour comparer des hélices entre elles ; mais les conclusions que l'on peut en tirer doivent toujours être regardées comme provisoires tant qu'elles n'ont pas été confirmées par des expériences faites dans des conditions plus analogues à celles du fonctionnement réel. Dans les essais au point fixe, en effet, l'hélice se déplace toujours dans le

1. Le recul peut, dans les navires, être négatif. Voir sir Hiram Maxim, *op. cit.*, p 67.

2. Ici le kilogramme est le *kilogramme poids*, c'est-à-dire une unité de force. La tension du ressort en kilogrammes est, par définition, égale au nombre de kilogrammes qu'il faudrait suspendre à un ressort identique, supposé vertical, pour le tendre exactement de la même manière.

même fluide; celui-ci, au bout d'un certain temps, se trouve nécessairement animé d'un mouvement permanent et il faut dépenser moins de puissance pour entretenir ce mouvement permanent qu'il n'en faudrait pour communiquer des mouvements tourbillonnaires à des couches toujours *neuves* de fluide, comme cela se produit dans la plupart des utilisations pratiques de l'hélice. Signalons que le problème de maintenir un hélicoptère à une hauteur constante est analogue à l'essai au point fixe. D'une manière générale, le fonctionnement de l'hélice dans l'hélicoptère se rapproche bien plus que dans l'aéroplane ou dans les dirigeables du fonctionnement au point fixe. L'expérience et la théorie s'accordent à prouver que (à même vitesse de rotation) la poussée en marche est notablement plus faible qu'au point fixe (souvent la moitié, parfois même le tiers). Il en résulte d'ailleurs que le couple moteur nécessaire est diminué dans le même rapport.

Nous n'aborderons pas la théorie mathématique de l'hélice aérienne, car il ne nous a pas semblé possible de lui donner une forme satisfaisante en l'état actuel de nos connaissances aérodynamiques. C'est là une question des plus intéressantes, qui pourrait tenter un chercheur à la fois expérimentateur et mathématicien (voir p. 207).

A défaut de théorie mathématique complète de l'hélice, nous rappellerons des formules empiriques, dues au colonel Renard et dont la fortune assez universelle est peut-être due plus encore à leur simplicité qu'à leur exactitude. Leur emploi ne peut qu'être avantageux lorsqu'on n'oublie pas

qu'elles ne doivent être regardées que comme fournissant une indication assez grossièrement approchée et devant être contrôlée par l'expérience. Dans ces conditions, elles donnent du moins quelque lumière sur l'ordre de grandeur du phénomène étudié. Ces formules sont les suivantes : on désigne par n le nombre de tours par seconde, par d le diamètre, par F la poussée et par T le travail par seconde ; on a

$$F = \alpha n^2 d^4$$
$$T = \beta n^3 d^5$$

α et β étant des coefficients qui dépendent notamment du pas de l'hélice [1].

Ferber propose (*les Calculs*, p. 76) les formules plus précises :

$$F = h\,(\alpha r - \alpha')\, n^2 d^4$$
$$T = h^2\,(\beta r + \beta')\, n^3 d^5$$

dans lesquelles h désigne le pas et r le recul *relatif*, c'est-à-dire le rapport du recul absolu au pas. Les coefficients numériques α, α', β, β' doivent être déterminés par l'expérience.

Les hélices habituellement utilisées sont à deux

1. Ces coefficients dépendent aussi de la fraction du pas, du coefficient de la résistance de l'air, du coefficient de frottement et aussi du recul qui dépend lui-même de la résistance éprouvée par l'hélice ou, si l'on veut, de la vitesse de propulsion.

Ces formules peuvent être regardées, comme on l'a souvent remarqué, comme résultant de considérations d'homogénéité ; mais, à ce point de vue, elles ne présentent pas grand intérêt, c'est-à-dire n'accroissent pas beaucoup nos connaissances : la difficulté est reportée sur la détermination des coefficients α et β. Le raisonnement d'homogénéité prouve en effet que ces coefficients sont de dimension zéro en n et d : il n'en résulte pas que ce soient des constantes.

ailes, symétriques l'une de l'autre par rapport à l'axe. Il semble résulter d'essais au point fixe, faits par M. Boyer Guillon au laboratoire du Conservatoire des Arts et Métiers [1], que les hélices à quatre ailes sont légèrement supérieures aux hélices à deux ailes. Les hélices adoptées avaient un pas égal aux trois quarts du diamètre; la fraction du pas utilisé correspondait à un angle de 22° et les formules du colonel Renard pouvaient s'écrire sous la forme :

$$P = 0{,}026\ N^2d^4$$
$$T = 0{,}015\ N^3d^5$$

dans lesquelles T désigne le travail *à dépenser* pour obtenir *au point fixe* la poussée P. Les résultats, obtenus par les hélices construites d'après ces formules, ont conduit à modifier les coefficient numériques ; (le rayon de l'hélice étant de $1^m,22$) ; l'expérience a donné, pour les hélices à deux ailes

$$P = 0{,}019\ N^2d^4$$
$$T = 0{,}014\ N^3d^5 \text{ (pour N compris entre 4 et 6)}$$
$$T = 0{,}013\ N^3d^5 \text{ (pour N compris entre 8 et 9)}$$

pour l'hélice à trois ailes :

$$P = 0{,}023\ N^2d^4$$
$$T = 0{,}018\ N^3d^5$$

et pour les hélices à quatre ailes :

$$P = 0{,}028\ N^2d^4$$
$$T = 0{,}023\ N^3d^5$$

1. *Revue de Mécanique*, t. XXIV, p. 127 et suiv. (28 février 1909).

On voit que l'hélice à quatre ailes fournit une poussée inférieure au double de celle qui est obtenue par l'hélice analogue à deux ailes; mais le travail dépensé est aussi inférieur au double; avec les données numériques de l'expérience particulière, on obtenait avec 10 HP, une poussée d'environ 49 kilogrammes avec l'hélice à deux ailes et $52^{kg},5$ avec l'hélice à quatre ailes, soit environ 7 p. 100 en plus.

Nous retiendrons surtout de ceci que l'hélice aérienne peut donner au point fixe une poussée d'environ 5 kilogrammes par cheval-vapeur.

APPLICATION A L'HÉLICOPTÈRE. — On conclut du résultat précédent que, pour maintenir immobile dans l'atmosphère un hélicoptère pesant 500 kilogrammes, il faut une puissance d'environ 100 chevaux-vapeur; il faut naturellement une puissance légèrement supérieure si l'on veut s'élever. Ce résultat brut est sensiblement plus avantageux que le résultat obtenu pour l'orthoptère; on doit d'ailleurs ajouter, à l'avantage de l'hélicoptère, que le mouvement de rotation des hélices s'obtient bien plus naturellement que le mouvement alternatif de battement des ailes; il y a dans l'hélicoptère une utilisation aussi parfaite que possible de la puissance du moteur.

Bien qu'encourageant, le résultat théorique obtenu montre que la réalisation de l'hélicoptère est encore légèrement en deçà des ressources actuelles de la mécanique; quelques progrès seraient nécessaires dans la construction des moteurs pour rendre possibles des appareils d'un

poids raisonnable[1]. Sur 500 kilogrammes en effet, il faut en compter, au bas mot, 300 pour le bâti de l'appareil, le pilote, les hélices et les transmissions ; il ne reste donc que 200 kilogrammes, pour un moteur de 100 chevaux et sa provision de combustible. Ajoutons que le problème du refroidissement du moteur présente dans l'hélicoptère, des difficultés plus grandes que dans l'aéroplane et l'on comprendra le peu de succès des tentatives faites jusqu'ici. Mais l'on voit en même temps que l'on est en quelque sorte, sur le seuil de la réussite, au point où un perfectionnement, insignifiant d'apparence, peut déclancher le succès.

Pour des raisons que nous développons ailleurs[2], les petits modèles d'hélicoptères sont bien plus aisés à construire que les grands. *L'hélicoptère-joujou* a été fort répandu il y a une trentaine d'années. Le premier de ces appareils en miniature, le premier peut-être des plus lourds que l'air qui se soient élevés au moyen d'une force qu'ils avaient en eux (un ressort de baleine), est le petit hélicoptère présenté à l'Académie des Sciences de Paris le 28 avril 1784 par Launoy et Bienvenu. En 1863, Ponton d'Amécourt fit des expériences assez réussies avec un petit hélicoptère à vapeur ; il faut signaler, vers

1. Si l'on élève à plusieurs milliers de kilogrammes le poids de l'appareil, on gagne de pouvoir négliger le poids du pilote mais on se butte par contre à d'autres inconvénients, dont le plus sérieux est peut-être le prix très élevé de chaque expérience infructueuse.

2. Voir les remarques sur l'homothétie en mécanique dans la note II.

la même époque, les campagnes de Nadar dans *l'Aéronaute* en faveur du plus lourd que l'air. Au moment où Pénaud fit revivre, comme nous l'avons rappelé, la théorie de l'aéroplane, il se heurta à une certaine opposition de la part des adeptes nombreux et convaincus de l'hélicoptère.

Nous ne pouvons mentioner tous les essais, souvent peu caractéristiques, qui ont été faits depuis sur des modèles réduits d'hélicoptères; il ne s'en dégage aucun enseignement précis. Exception peut toutefois être faite pour l'hélicoptère de M. Kimball, caractérisé par un très grand nombre d'hélices de petites dimensions; il y a là une idée intéressante, malgré les difficultés pratiques que présentent les transmissions multiples de mouvement exigées par cette solution. Si ces transmissions étaient telles que les hélices soient indépendantes, c'est-à-dire qu'un accident arrivé à l'une d'elles ait pour seul résultat de la désembrayer, la puissance disponible étant reportée sur les autres, le bon fonctionnement de l'appareil serait indépendant d'un tel accident d'hélice, ce qui augmenterait notablement la sécurité de l'hélicoptère.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'HÉLICOPTÈRE. — L'inconvénient principal de l'hélicoptère pur, c'est-à-dire ne possédant pas de plans sustentateurs, est en effet d'être entièrement à la merci d'un arrêt du moteur ou de l'éclatement de l'hélice dans le cas où l'hélice est unique et même dans le cas où les hélices sont peu nombreuses) ; l'hélicoptère n'étant plus soutenu, tombe sur le sol

comme un corps solide libre, c'est-à-dire avec une vitesse de 20 mètres à la seconde (soit 72 kilomètres à l'heure) s'il naviguait seulement à 20 mètres de hauteur ; d'une hauteur de 80 mètres, la vitesse serait de 40 mètres à la seconde, soit 144 kilomètres à l'heure. Le choc serait comparable à la collision de deux trains express se précipitant à la rencontre l'un de l'autre. Ce terrible danger suffira pour faire écarter l'hélicoptère pur, tant qu'il ne sera pas possible d'y parer par l'emploi simultané de plusieurs moteurs et de plusieurs systèmes d'hélices disposés de telles sorte qu'une panne partielle ne soit pas fatale et permette du moins d'atterrir sans choc [1].

Par contre, l'hélicoptère présente certains avantages dont le principal est de pouvoir s'élever verticalement et de pouvoir rester ensuite immobile, en un poste d'observation. Ces avantages peuvent être très précieux dans les applications militaires.

On peut ajouter que la réalisation d'hélicoptères fonctionnant régulièrement entraînerait pour le problème général de l'aviation des progrès considérables (moteurs, transmissions, hélices, etc.),

1. On pourrait aussi songer à emporter un parachute ; mais cette *solution mixte* ne paraît pas pratique ; un planeur est moins encombrant et moins lourd. Signalons en passant, un très ingénieux appareil réalisé par M. Louis Bréguet, le gyroplane, dans lequel des hélices dont l'axe est incliné à 45 degrés jouent le double rôle de sustentateur comme dans l'hélicoptère et de propulseur comme dans l'aéroplane. Cet appareil a donné lieu à des essais intéressants, mais n'a pas encore réussi d'envolées de grande étendue. Il semble d'ailleurs que son inventeur ait, du moins provisoirement, abandonné le gyroplane pour s'attacher au perfectionnement de l'aéroplane.

progrès dont bénéficieraient aussitôt les appareils de modèle différent. Cette considération seule suffirait à ne pas détourner entièrement de l'hélicoptère les chercheurs justement attirés par les succès de l'aéroplane.



CHAPITRE III

LES AÉROPLANES SANS MOTEURS
CERFS-VOLANTS ET PLANEURS

Avant d'aborder l'étude de l'aéroplane proprement dit, ou aéroplane à moteur, il nous paraît utile de dire quelques mots de deux catégories d'appareils assez différents entre eux mais cependant à des titres divers, précurseurs de l'aéroplane : les cerfs-volants et les planeurs.

Cerfs-volants.

HISTORIQUE. — Le cerf-volant, en tant que jouet d'enfant, paraît avoir été connu depuis fort longtemps par des peuples divers [1] ; la première application scientifique en est due à Benjamin Franklin qui, dans des expériences restées célèbres (1742), s'en servit pour étudier l'électricité atmosphérique, et déduisit de cette étude l'invention du paratonnerre. L'invention des ballons sphériques ralentit le développement des appli-

1. On le signale notamment en Chine et au Japon dans une antiquité très reculée.

cations scientifiques du cerf-volant ; malgré l'admirable précédent de Franklin on persista à le regarder comme un jouet et c'est seulement à la fin du XIXe siècle que l'on se rendit compte à quel point cet instrument peut être précieux pour l'exploration et la conquête de l'atmosphère. Ce mouvement en faveur du cerf-volant doit être en grande partie attribué à l'australien Hargrave qui fit de nombreuses expériences et s'enleva en 1894 au moyen d'un train formé de cerfs-volants *cellulaires* de son invention. Quelques années plus tard, en 1896, l'officier anglais Baden-Powell réussit à s'élever d'une centaine de mètres au-dessus du sol au moyen également d'un train de cerfs-volants. Ce n'est pas tout à fait de l'aviation, mais c'est le sport qui s'en rapproche le plus. Depuis, nombreux ont été les essais dans lesquels on s'est servi du cerf-volant pour enlever des poids lourds, le plus souvent des appareils scientifiques, rarement des hommes. A défaut d'ornithoptères ou d'hélicoptères non encore réalisés, c'est actuellement le seul moyen pour un homme de s'élever rapidement à quelques dizaines de mètres suivant la verticale, à partir d'un point de départ quelconque et au moyen d'un matériel léger et facile à transporter. Ces diverses conditions sont évidemment favorables aux applications du cerf-volant dans les reconnaissances militaires.

DESCRIPTION THÉORIQUE. — Indiquons le principe même du cerf-volant sur un appareil schématique. Un tel appareil, s'il pouvait être réalisé

avec quelque stabilité [1], fournirait la méthode la plus simple et la plus pratique pour l'étude expérimentale des lois de la résistance de l'air et aussi des variations du vent dans les régions élevées de l'atmosphère.

Un tel cerf-volant schématique se compose d'une surface plane ABCD (que nous figurons rectangulaire (fig. 8), mais qui pourrait avoir toute autre

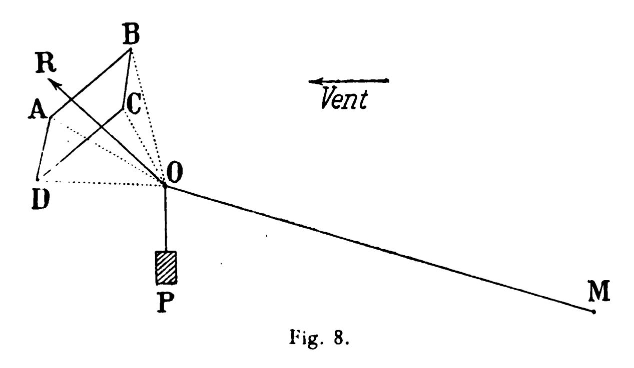


Fig. 8.

forme) dont divers points sont réunis par des fils à un même point O. A ce point O est attachée une corde OM dont l'autre extrémité est fixée en un point M du sol [2] ; au point O est suspendu aussi un poids P par une corde verti-

1. Les complications de forme, l'introduction des cloisonnements ou d'une queue ont précisément pour but d'assurer la stabilité mais rendent en même temps moins sûres les conclusions théoriques que l'on peut tirer du fonctionnement de l'appareil.

2. On sait que, lorsqu'il n'y a pas de vent, on produit un *vent relatif* en déplaçant le point M ; nous nous plaçons ici dans l'hypothèse plus simple où il y a du vent; le point M peut alors être absolument fixe.

cale OP. Au point O sont ainsi appliquées trois forces : la tension de la corde OM, la tension de la corde OP et la résultante R des actions du cerf-volant proprement dit (actions qui s'exercent par l'intermédiaire des fils OA, OB, OC, OD). Ces trois forces se font équilibre ; il est donc possible de déterminer R, connaissant les deux autres forces[1] ; on arrive donc à la conclusion : à l'état d'équilibre, la poussée du vent sur la surface ABCD est précisément égale à la force R ainsi calculée (un terme correctif, en général négligeable est le poids de cette surface ABCD). La résistance de l'air se trouve ainsi mesurée dans des conditions qui se rapprochent le plus possible des conditions où elle est utilisée pour l'aviation.

La figure précédente suffit pour montrer que si le vent est assez fort, la poussée R du vent est supérieure aux forces qui lui sont opposées et par suite le cerf-volant s'élève. Lorsqu'il n'y a pas de vent (ou que le vent est faible) on crée un *vent relatif :* l'enfant court en tenant à la main la corde de son cerf-volant : on peut ainsi arriver à une vitesse de régime dans laquelle tout le système se déplace d'un mouvement de translation, en gardant une configuration invariable. En d'autres termes, tout se passe comme si l'enfant qui

1. La tension de la corde OM peut être aisément mesurée en M au moyen d'un dynamomètre ; si le poids de la corde n'est pas négligeable, un calcul facile permet d'en déduire la direction et la valeur de la tension en O ; si la corde OP est assez courte et le poids P assez dense pour ne pas être sensiblement dévié par le vent, la force dirigée suivant OP est précisément mesurée par ce poids P.

tire la corde était attelé à une voiture rigide ; en exerçant un effort convenable, compensant précisément les résistances passives (frottement des roues contre le sol dans le cas de la voiture, résistance de l'air dans le cas du cerf-volant) on arrive à établir une vitesse uniforme. Pour un cerf-volant de forme et de surface données, la vitesse de régime en air calme dépend de l'angle d'attaque de l'air que l'on peut faire varier en modifiant les longueurs des fils OA, OB, OC, OD ; on peut se proposer de déterminer cet angle d'attaque de manière que l'on obtienne la plus grande vitesse horizontale possible avec la puissance minimum ; on peut ainsi chercher à rendre minimum la tension de la corde, de manière à pouvoir employer une corde assez mince sans risque de rupture : ceci est surtout important si le cerf-volant doit s'élever à une grande hauteur, car le poids de la corde peut alors devenir un élément important du problème et une source de difficultés.

Appareils actuels. — Nous avons parlé de « train de cerfs-volants ». Les premiers expérimentateurs qui tentèrent de se faire enlever par cerf-volant employèrent un cerf-volant unique et gigantesque après lequel ils s'attachaient. Ainsi firent Le Bris en 1856, Maillot en 1886. Mais les dimensions encombrantes des appareils et les difficultés de manœuvre qu'elles entraînaient entravèrent les expériences.

On eut alors l'idée de répartir la surface totale nécessaire entre plusieurs appareils enlevant une

nacelle. Primitivement, on fit des trains de cerfs-volants cellulaires (Hargrave) et des trains de cerfs-volants plans (Baden-Powell). Il semble que les trains cellulaires ont été adoptés partout.

Plusieurs écoles se sont formées pour le mode de composition des trains. On peut les ramener à trois types : 1° On peut rattacher séparément les cerfs-volants à des cordes de retenue *d'inégales longueurs* et réunir toutes ces cordes à l'extrémité d'un câble commun ; 2° On peut rattacher les cerfs-volants à des cordes de *même longueur* et fixer ces cordes en des points différents et espacés du câble commun ; 3° On peut lancer un premier cerf-volant à l'extrémité du câble unique de retenue et fixer les autres cerfs-volants directement sur ce câble, sans corde séparée.

De même on peut suspendre la nacelle en un point fixe du câble de retenue ou à un câble secondaire indépendant du câble de retenue. Le capitaine Cody réalisa cette seconde méthode (1906). Tout récemment, le capitaine Saconney a fait en France des essais intéressants. Voici un aperçu des trains de cerfs-volants Saconney :

Ils sont formés de planeurs Cody, tous semblables. Le planeur Cody a quatre faces, et est fait de quatre longues arêtes dessinant l'ossature rectangulaire d'une boîte et reliées par des montants. Deux solides perches de bambou se croisent en diagonale dans les deux rectangles des petites bases ; l'extrémité de ces perches dépasse les angles pour former la nervure des ailerons triangulaires qui rendent l'appareil stable. L'ai-

leron de la face supérieure est plus proéminent que celui de la face inférieure. L'entoilage forme deux cellules à chaque extrémité des arêtes ou longerons. Chacune des cellules est partagée en deux compartiments par un plan de symétrie. L'ensemble est maintenu rigide par un système de haubans en fil d'acier.

Chacun de ces planeurs est fixé au câble par l'extrémité avant des longerons inférieurs. Deux, trois, quatre planeurs forment le train principal, qui tend dans l'air le câble de retenue. La nacelle est suspendue à un chariot mobile roulant sur ce câble une fois tendu. Un train secondaire de cerfs-volants commande la nacelle qui peut parcourir à volonté, en actionnant le train secondaire, toute la longueur du câble tendu par le premier train, monter et descendre, le train principal restant en l'air.

Le train principal peut atteindre de hautes altitudes (4.000 mètres, dit-on). Dans la nacelle, le capitaine Saconney s'est élevé à 200 mètres. En Angleterre, des expérimentateurs de systèmes analogues sont parvenus à 600 et 800 mètres. En Russie, on a obtenu aussi de beaux résultats.

Pour donner une idée de la dimension de ce genre de cerf-volant, citons les caractéristiques d'un modèle russe :

Surface totale	8 mètres
Poids.	14 kilogrammes
Longueur.	3m, 60
Largeur	2m, 20
Distance entre les cellules . .	1m, 85
Ecartement des surfaces. . . .	0m, 80

Planeurs.

On donne le nom de planeurs à des appareils ayant pour but de permettre à l'homme d'imiter le planement des oiseaux, sans faire appel à aucune énergie, c'est-à-dire sans que le pilote ait à faire usage d'un moteur ni à déployer sa force musculaire (si ce n'est pour la direction et l'équilibre). Ce que nous avons dit des difficultés du vol à la voile permet de prévoir que, sauf le cas très exceptionnel et forcément momentané d'un vent ascendant régulier, le planeur ne pourra fonctionner qu'en *descente*. Cette condition restreint évidemment beaucoup les applications pratiques ; aussi est-ce surtout comme instrument d'expérience que le planeur est précieux ; et, dans ce cas, l'obligation de descendre est de peu d'importance, car il est oujours possible de se placer pour les expériences sur un sol incliné.

Le planeur reste encore dans certains cas un instrument d'expérience précieux ; mais l'on peut dire qu'il a été *indispensable* jusqu'au jour où, grâce aux expériences qu'il avait rendu possibles, l'aéroplane à moteur a pu fonctionner d'une manière régulière. Essayer en effet de placer un moteur sur un planeur dont le pilote n'a pas acquis une certaine habileté de manœuvre et d'équilibre, c'est s'exposer, au cas où le moteur ne serait pas insuffisant pour enlever l'appareil du sol[1], à soumettre ce pilote à un redoutable

1. Ce fut le cas dans l'expérience d'Ader : les témoignages sont contradictoires sur le point de savoir si l'avion a réellement quitté

dilemme : ou bien il sera effrayé de son propre succès et fera immédiatement la manœuvre qui le ramènera vers le sol ; ou bien il se laissera porter dans les airs à une hauteur considérable et son inexpérience l'exposera presque sûrement à une chute très dangereuse. Dans les deux cas, l'expérience sera manquée, e ce qui est plus grave, manquée dans des conditions qui ne rendront pas son échec utile pour la préparation d'un nouvel essai.

Ce fut la gloire de Lilienthal de comprendre toute l'importance des essais de vol plané et surtout d'oser les entreprendre avec une méthode, une ténacité et un courage qui ne furent domptés que par la mort.

L'appareil de Lilienthal était un monoplan; certains de ses imitateurs usèrent de biplans (dont l'idée paraît revenir à Chanute) et de multiplans ; nous comparerons ces divers systèmes à propos des aéroplanes, nous bornant à indiquer ici les lignes communes de leur théorie.

Si l'on se borne à la descente planée en ligne droite, il n'y a pour ainsi dire rien à ajouter à ce que nous avons dit de ce genre de vol chez les

le sol ; mais, même en admettant comme très vraisemblable la réalité de cette envolée, il est certain que ce fut plutôt un bond qu'un véritable vol ; l'appareil ne s'est élevé qu'à quelques centimètres au-dessus du sol ; et cette circonstance fut peut-être heureuse car il est très vraisemblable qu'un pilote inexpérimenté élevé brusquement à plusieurs mètres au-dessus du sol aurait été victime d'un accident effroyable. Sir Hiram Maxim avait eu la précaution de faire rouler son aéroplane sur un système de rails dont l'un ne permettait pas son élévation ; il a ainsi évité cette cause d'accidents, mais en même temps a rendu son expérience bien moins concluante pour les spectateurs et le public.

oiseaux ; il convient toutefois de faire quelques remarques sur l'usage des gouvernails et sur les virages ; nous allons tâcher de les présenter sous la forme la plus élémentaire et la plus intuitive possible, réservant pour plus loin les développements mécaniques plus précis et plus rigoureux.

Un planeur se compose essentiellement d'une surface portante, d'étendue considérable (au moins 10 mètres carrés et jusqu'à 50 mètres carrés) et sensiblement plane (ou disposée suivant plusieurs plans parallèles) ; cette surface portante, que nous appellerons le plan de l'appareil est, dans le vol, à peu près horizontale ; si l'air est calme, ou le vent horizontal, elle doit être légèrement relevée vers l'avant, suivant les remarques faites plus haut à propos de la descente planée des oiseaux. A cette surface portante, base même de l'appareil se trouvent invariablement liés trois organes essentiels : le *siège du pilote*, à côté duquel sont les leviers[1] commandant le *gouvernail de hauteur* et le *gouvernail de direction* (ce dernier pourrait être supprimé si l'on se bornait à planer en ligne droite sans chercher à virer). Chacun de ces gouvernails se compose essentiellement d'une surface plane (ou de deux surfaces planes parallèles) d'étendue bien moins grande que la surface portante et mobile par rapport à cette surface. En déplaçant ces gouvernails, on peut provoquer un

1. Un seul levier pourrait commander simultanément ces deux gouvernails s'il pouvait être manié de deux manières différentes (d'avant en arrière et de gauche à droite) : ce qu'on exprime aussi en disant qu'il aurait deux degrés de liberté ; nous retrouverons de tels leviers dans l'aéroplane Wright.

changement d'inclinaison de l'appareil, soit vers le haut ou le bas à l'aide du gouvernail de profondeur mobile autour d'un axe horizontal, soit vers la droite ou la gauche à l'aide du gouvernail de direction mobile autour d'un axe vertical. Mais il faut bien se rendre compte que la manœuvre du gouvernail ne saurait suffire à elle seule pour réaliser le but désiré ; pas plus qu'il ne suffit de tourner le guidon d'une bicyclette pour effectuer un virage ; on sait que le cycliste doit incliner son corps vers l'intérieur du virage. Nous étudierons les manœuvres analogues du pilote d'aéroplane au chapitre VII et développerons dans la note I quelques formules mécaniques qui permettent seules d'aborder la question avec la rigueur désirable. Vu l'importance du sujet, nous allons donner dès à présent quelques indications sur la manœuvre des gouvernails dans le planeur.

MANŒUVRE DU GOUVERNAIL DE PROFONDEUR. — Le planeur descend suivant la ligne MN (fig. 9) : comme nous l'avons expliqué plus haut, le vent relatif (l'air supposé calme) a une direction opposée à celle du mouvement, c'est-à-dire vv' ; ce vent produit une réaction dont le double effet est de ralentir la chute et d'entretenir la propulsion horizontale. Mais supposons que pour une raison quelconque (mouvement du pilote, brise irrégulière, etc.) la surface portante AB s'incline par rapport au vent relatif vv' ; la poussée OP changera de sens et aura pour effet (fig. 10) de ralentir le mouvement horizontal par sa composante OP_1, et de précipiter la chute par sa compo-

sante OP_2. De plus, il arrivera fréquemment, par suite de la position du centre de poussée dans le cas d'un faible angle d'attaque, que la poussée OP

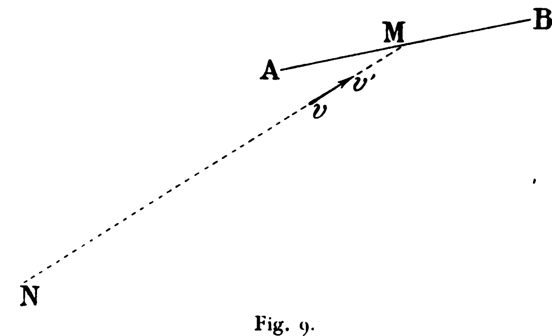


Fig. 9.

inclinera vers le sol l'avant OA de la surface portante, de sorte que la très faible inclinaison primitive s'accentuera d'elle-même ; l'appareil

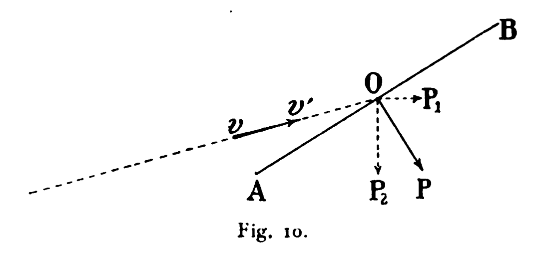


Fig. 10.

piquera du nez, c'est-à-dire que AB deviendra vertical ; ce sera la chute rapide et un accident souvent très grave. Bien entendu, ces phénomènes se produisent en beaucoup moins de temps qu'il n'en faut pour les décrire ; à peine

le vent *vv'* a-t-il agi au-dessus de AB que la chute est déjà irrémédiable, si le pilote n'a pas manœuvré son gouvernail de profondeur. Mais si le pilote connaît assez bien son appareil pour sentir instantanément l'accident possible et assez de sang-froid et de décision (ou des réflexes assez bien éduqués) pour exécuter immédiatement la manœuvre nécessaire, il inclinera fortement le plan de son gouvernail de profondeur CD (qui n'a

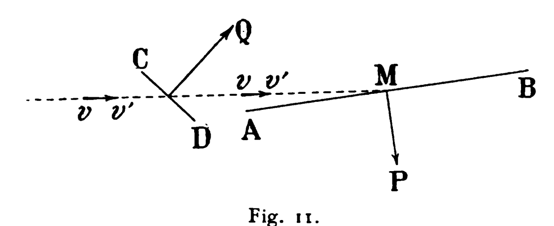


Fig. 11.

pas été indiqué sur les figures précédentes) ; la poussée Q ainsi créée (fig. 11) a visiblement pour effet de relever l'avant de l'appareil[1] et par suite de rétablir l'attaque du vent *au-dessous* de AB. Bien entendu, la manœuvre ne doit pas être prolongée de manière à cabrer l'appareil ; il y a un doigté très délicat à acquérir, car la moindre erreur peut être fatale : il en est de même d'ailleurs pour celui qui tient le volant d'une automobile lancée à grande vitesse lorsque survient un virage ou un obstacle imprévus ; l'accident ne peut être évité qu'en effectuant en une faible frac-

1. Les deux poussées P et Q forment sensiblement un couple redresseur.

tion de seconde les mouvements exactement nécessaires. Or, les rafales du vent sont plus imprévues et surtout bien plus difficiles à percevoir exactement que les accidents d'une route.

Aussi les pilotes ont-ils grand soin d'éviter le plus possible d'avoir à effectuer la manœuvre que nous venons de décrire ; c'est avant que le vent ne prenne A B par-dessus, qu'ils relèvent légèrement le gouvernail de profondeur, de manière à faire varier un peu l'inclinaison dans le sens convenable.

L'étude de la stabilité ou de l'instabilité de ces variations d'inclinaison ne peut guère être faite sans introduire des précisions numériques et des calculs assez compliqués : avec certains appareils, il existera un certain régime permanent stable et les manœuvres du gouvernail auront seulement pour but d'y revenir lorsqu'on s'en sera momentanément écarté par accident ; avec d'autres, au contraire, la manœuvre constante du gouvernail de profondeur sera nécessaire pour maintenir l'inclinaison convenable. Il ne faut pas d'ailleurs s'exagérer les difficultés de cette manœuvre continuelle; sans doute, elle exige de la part du pilote une attention soutenue, sans distraction ; mais c'est aussi le cas du bicycliste sur une route; s'il oubliait pendant quelques secondes de regarder la route pour rectifier à chaque instant sa direction, il tomberait dans le fossé, même s'il conservait son équilibre ; l'expérience montre que cette rectification constante de la direction s'accomplit presque automatiquement, dès que l'on a tant soit peu la pratique de la bi-

cyclette ; on conçoit aisément qu'il puisse en être de même pour le gouvernail de profondeur[1].

MANŒUVRE DU GOUVERNAIL DE DIRECTION. — Tandis que dans les figures précédentes nous représentions le planeur vu de côté, nous le figurerons maintenant vu de dessus[2], par un observateur situé suffisamment haut.

La surface portante est alors représentée par le

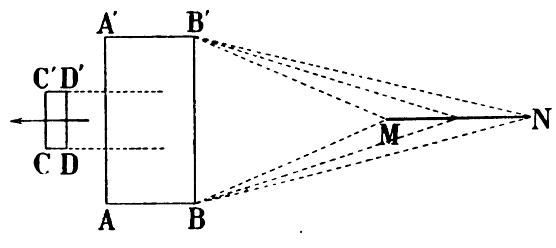


Fig. 12.

rectangle AB A'B' (fig. 12) ; le gouvernail de profondeur par le rectangle CD C'D', situé à l'avant et le gouvernail de direction par la droite MN ; nous le figurons formé d'un seul plan : il est parfois biplan.

1. Nous avons supposé que le gouvernail était à l'avant ; il pourrait aussi être à l'arrière : sa sensibilité serait amoindrie mais une faute de manœuvre se corrigerait d'elle-même. Le gouvernail d'avant est plus actif mais plus dangereux. On peut le qualifier de *progressif* et le gouvernail d'arrière de *régressif* : si on les emploie tous deux, l'effet est constant ; nous reviendrons sur ce point à propos de l'aéroplane.

2. Plus précisément, nous représentions une projection verticale sur le plan de symétrie de l'appareil ; nous allons figurer une projection horizontale.

Le planeur se dirigeant dans le sens indiqué par la flèche (c'est-à-dire de la droite de notre figure vers la gauche), le plan MN reçoit le vent relatif sur sa tranche, c'est-à-dire a une action à peu près négligeable ; on modifie sa direction en M'N'; que va-t-il se passer ? Le vent relatif (fig. 13) déterminera une pression P qui aura visiblement pour résultat de faire tourner l'appareil jusqu'à ce que M'N' soit de nouveau dans la direc-

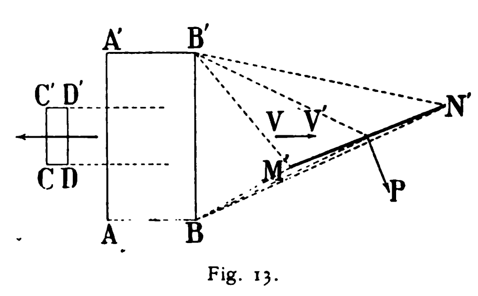


Fig. 13.

tion du vent relatif ; mais cela ne modifiera en rien la direction générale de la marche de l'appareil[1] ; la seule différence, c'est que l'appareil se présente obliquement à la direction dans laquelle il se déplace, ce qui est évidemment une mauvaise condition pour la stabilité (fig. 14).

Est-il donc impossible de virer ? Nullement, mais la manœuvre du gouvernail ne suffit pas ;

1. Rigoureusement parlant, la force P peut être remplacée par un couple produisant la gyration indiquée et une force égale à P placée au centre de gravité et qui a pour effet de modifier légèrement la trajectoire ; mais il est très aisé de se rendre compte que cette seconde action est à peu près négligeable, vu le temps très court qui suffit pour aligner M' N' dans le vent.

il faut, ou bien que l'appareil ait une quille, ou bien que l'on puisse exécuter d'autres manœuvres sur les surfaces portantes, ou bien enfin, qu'il ait un propulseur (hélice) dont l'action soit modifiée par le seul fait que l'appareil tourne. Nous étudierons les deux dernières solutions à propos de l'aéroplane; indiquons brièvement quelle peut être l'influence de la quille.

La quille est essentiellement une surface plane coïncidant avec le plan de symétrie de l'appa-

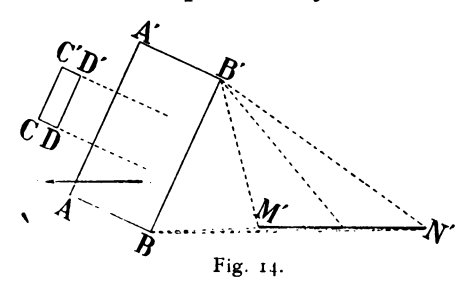


Fig. 14.

reil (plan vertical, en marche normale); elle a pour effet de tendre constamment à diminuer l'angle que fait, avec ce plan de symétrie, la direction du déplacement. L'action de la quille est variable avec sa forme et sa disposition; plus précisément, il est essentiel de tenir compte de la disposition relative du *centre de poussée* (point d'application de la résultante des actions de l'air sur la quille [1]) et du *centre de gravité*

1. Avec certaines formes de quille, il peut même arriver que ces actions ne se ramènent pas à une force unique, mais à une force et un couple : c'est, *a priori*, le cas général ; mais, *en fait*, il semble bien que le couple puisse être négligé dans les circonstances où l'on se trouve effectivement en pratique.

de l'appareil. Nous nous bornerons au cas où les deux centres coïncident; l'action de l'air sur la quille est alors une force directement appliquée au centre de gravité et ayant par suite pour effet de modifier sa trajectoire. La quille étant figurée en HK (fig. 15), et la trajectoire du point A étant AM, l'action de la force AP est d'incurver cette trajectoire suivant la ligne pointillée AM′, c'est-à-dire de tendre à rendre la vitesse parallèle à HK ; si ce résultat était rigoureusement atteint, la force AP disparaîtrait, et le mouvement ne

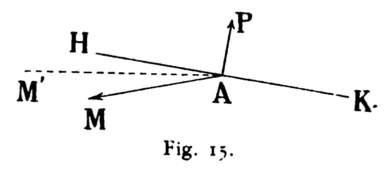


Fig. 15.

serait plus modifié. On voit que l'action de la quille est essentiellement stabilisatrice; dans le virage à l'aide du gouvernail de direction, l'effet du gouvernail est de faire tourner l'appareil sur lui-même, de manière à permettre à l'action de la quille de s'exercer, mais c'est cette action qui est essentielle. Ce virage idéal n'est pas réalisé parce que l'appareil ne reste pas vertical ; le phénomène est plus complexe comme nous le verrons. Le rôle stabilisateur de l'empennage en marche droite est essentiellement dû à ce que le centre des pressions verticales est *en arrière* du centre de gravité et son rôle dans le virage est dû à ce que ce centre de pressions est *au-dessus* du centre de gravité, condition réalisée en particulier dans les aéroplanes Voisin.

La quille proprement dite, coïncidant avec le plan de symétrie de l'appareil, n'est guère usitée que dans les monoplans; dans les biplans, on emploie plutôt des cloisons verticales en nombre pair (2 ou 4), symétriquement disposées par rapport au milieu de l'appareil ; leur effet stabilisateur s'explique par les mêmes considérations.

Nous reviendrons sur la théorie du virage au ch. V, à propos de l'aéroplane et nous étudierons alors plusieurs points que nous avons laissés de côté : inclinaison de l'appareil, force centrifuge, gauchissement des ailes et ailerons, effet gyroscopique de l'hélice (qui n'existe pas dans le planeur).

Bien qu'incomplètes, les indications que nous venons de donner permettent d'entrevoir combien sont délicates la construction et la manœuvre d'un planeur; les difficultés réelles sont plus grandes encore, car nous n'avons point traité la question de la stabilité.

L'étude expérimentale des planeurs était cependant, nous l'avons vu, la préface nécessaire à la construction de types d'aéroplanes pouvant réussir. Ce fut la voie ouverte par Lilienthal, et suivie après lui par tous ceux à qui sont dus les progrès décisifs : Chanute et les Wright, en Amérique; Ferber, Archdeacon et les frères Voisin, en France.

Les succès de l'aéroplane relèguent-ils le planeur dans le domaine des simples curiosités historiques? Il ne le semble pas. Sans doute, les résultats acquis dès à présent par les aviateurs permettent de réaliser progressivement des

modifications aux types connus et plusieurs pilotes sont assez habiles pour essayer les appareils ainsi modifiés. Mais il serait prématuré de considérer comme close la période des inventions vraiment neuves, différant assez des types éprouvés pour que l'essai sans moteur en soit plus prudent que l'essai avec moteur.

CHAPITRE IV

L'AÉROPLANE

Généralités.

Nous arrivons enfin au roi du jour, à l'aéroplane avec moteur, ou aéroplane proprement dit. Nous avons déjà, dans l'Introduction, décrit sommairement l'aéroplane ; nous entrerons à la fin de ce chapitre dans quelques détails sur les types les plus importants ; nous voudrions insister tout d'abord ici sur l'analogie avec l'oiseau.

Prenons un oiseau qui vole d'un vol plané propulsé. Comme nous l'avons vu précédemment, il garde les ailes étendues et de temps à autre donne du bout arrière des ailes un coup de rame horizontal qui le propulse en avant. Dans un tel vol, il est tout à fait comparable à un aéroplane monoplan ; les deux ailes forment un plan incliné, et les coups de rame du bout des ailes remplacent les tours de l'hélice.

Poursuivons la comparaison. Que fait l'oiseau quand il atteint, comme le martinet, ces vitesses qui nous semblent vertigineuses, de 200 et 300 kilomètres à l'heure ? Il s'allonge, il s'efface et aplatit ses ailes le plus possible sur un plan horizontal. Car, plus il va vite, plus il peut dimi-

nuer l'étendue et l'inclinaison de sa voilure sustentatrice, et plus s'atténue la résistance que l'air oppose à cette voilure, c'est-à-dire à ses ailes. En un mot, avec une moindre surface et une plus faible inclinaison, du moment que sa vitesse est suffisamment grande, il se soutiendra et néanmoins la résistance que l'air opposera à sa marche en avant sera diminuée.

Les mêmes remarques s'appliquent à l'aéroplane : à très grande vitesse, il lui suffira d'une faible voilure, à peine inclinée (pourvu qu'un procédé convenable lui permette d'élargir ses ailes en cas de ralentissement ou d'atterrissage). On arriverait ainsi à cette conclusion singulière : plus l'oiseau ou l'aéroplane marche vite et moins il rencontre de résistance à l'avancement ; il n'y aurait pour ainsi dire aucune limite à sa vitesse. Voilà du moins la conclusion qui serait exacte si la seule résistance qui s'oppose à l'avancement était celle qui s'exerce sur les ailes. Malheureusement, il n'en est pas ainsi, et nous avons déjà noté que l'air frappe non seulement les ailes, mais le corps de l'oiseau et, dans le cas de l'aéroplane, le corps du pilote, des passagers, le moteur, le bâti et les supports de l'appareil ; d'où un ensemble de résistances nuisibles qui ne contribuent en rien à la sustentation et s'opposent intégralement au mouvement en avant.

Pour réduire au minimum ces résistances nuisibles, les futurs aéroplanes présenteront, sans doute, un avant en forme d'obus, dans lequel seront placés pilote, passagers, moteur, etc., et à l'arrière une forme fuselée.

Quelle sera la vitesse de ces aéroplanes ? Certains prophètes ont annoncé déjà qu'avant quelques années, elle atteindra 400 kilomètres à l'heure. Ce sont des gens pressés. D'autres, au contraire, en vertu de calculs puérils et de quelques misérables règles empiriques sûrement fausses, et qui dissimulent mal notre ignorance de la théorie des mouvements des fluides, prétendent limiter dès maintenant et pour toujours à 180 kilomètres ou à 150 kilomètres la vitesse maxima des oiseaux artificiels. On peut leur rappeler l'exemple de Navier, mécanicien de belle taille pourtant, qui, appliquant sans critique certaines lois expérimentales alors admises, arrivaient à cette conclusion que 17 hirondelles valent un cheval.

La vérité, c'est qu'il nous est impossible aujourd'hui de prédire ce que sera, dans un siècle, la vitesse des aéroplanes. Mais il est certain qu'elle dépassera considérablement les vitesses actuelles. Et c'est là peut-être un des caractères les plus remarquables du vol artificiel. Tous les modes de locomotion inventés par l'homme, chemin de fer, automobile, navire, dirigeable, ont atteint aujourd'hui, ou peu s'en faut, leur vitesse limite. L'aéroplane, au contraire, non seulement permet (comme le dirigeable), d'aller droit d'un point à un autre, mais son avenir de vitesse est encore largement ouvert[1].

Il faut bien se garder de croire, d'ailleurs, que

1. Nous reviendrons plus loin (ch. VII) sur les difficultés que rencontre actuellement l'augmentation de la vitesse des aéroplanes.

notre organisme se prête mal aux très grandes vitesses. Ce qui rend pénible le fouettement de l'air, quand une automobile atteint, par exemple, 150 kilomètres à l'heure, ce sont d'abord et surtout les poussières qui bombardent le visage et les yeux. Ce sont ensuite les cahots incessants de la route, et enfin la proximité du sol et sa fuite vertigineuse. Mais, dans un air absolument dénué de poussières, une grande vitesse se supporte très aisément et n'offre aucun inconvénient pour la respiration. En outre, à une hauteur suffisante, elle n'entraîne qu'un changement assez lent de paysage, qui n'a rien de commun avec le bousculement éperdu des objets voisins.

Qu'il nous soit permis de faire ici appel à un souvenir personnel [1].

« C'est par un soir d'automne glacial, que je me suis envolé avec Wilbur Wright ; le soleil se couchait au moment du départ.

« Le signal donné, nous voilà lancés dans l'espace. Sensation de délices et de vertige. Il semble qu'on perd son poids en quelques secondes ; suivant la pittoresque expression de M. Deutsch, on se croirait un oiseau qui s'envole avec sa cage. Nous volons, nous volons ; nous tournons une fois, deux fois, vingt-neuf fois autour du vaste camp. Avec deux petits leviers, sans effort, Wright vire, incline son aéroplane, le redresse, s'élève, redescend en se jouant. Les fils de commande, si délicats, sont les prolongements des

1. Il est à peine besoin de dire que ces souvenirs personnels sont de M. Paul Painlevé seul.

nerfs du pilote. Il sent l'air avec ses toiles comme l'oiseau avec ses ailes ; la stabilité est complète, sans vibrations. A peine un faible tangage régulier, que réprime sans cesse une légère manœuvre de la main gauche. Un remous nous prend à un virage. Wright ramène son appareil comme un cheval qui fait un écart, et je comprends, aux applaudissements d'en bas, qu'il vient d'accomplir quelque chose d'émouvant, mais je m'en doutais à peine.



Fig. 16. — Biplan Wright (octobre 1908).

« Nous tournons, nous tournons, mais ce n'est plus sur le camp d'Auvours que nous planons dans le crépuscule, c'est sur la face indéterminée de la terre, dominée, conquise par le grand oiseau.

« Ajouterai-je que, fort légèrement vêtu, j'ai supporté ce voyage de 70 minutes avec une allégresse parfaite. J'ai eu froid sans doute, mais pas plus que les spectateurs qui attendaient en bas. Quant au glissement de l'air sur le visage découvert, c'est une caresse dont il est difficile

d'exprimer la douceur. Cependant nous marchions à une vitesse de 60 kilomètres à l'heure, qui eût été pénible en automobile dans les mêmes conditions.

« Dirai-je enfin que l'attention passionnée que je prêtais aux moindres mouvements du pilote ne m'empêchait pas d'admirer la beauté du soir, les grandes nuées rouges qui stagnaient à l'Occident, par delà la ligne sombre des grands pins et les yeux énormes et innombrables des automobiles s'allumant dans la nuit grandissante comme les feux d'un camp barbare. Nos enfants, dans tous les cas, nos petits-enfants, connaîtront des sensations autrement saisissantes, et les voyages à grande vitesse et à grande hauteur seront pour eux une source de jouissances toutes nouvelles. »

Description des principaux types.

Les aéroplanes ayant fait leurs preuves peuvent être rattachés à trois types principaux : les biplans Voisin et Wright ; le monoplan Blériot. Indiquons rapidement les caractéristiques de ces divers types. Nous dirons ensuite un mot des biplans Farman et des monoplans Antoinette.

LE BIPLAN VOISIN. — Nous avons déjà rappelé les débuts de Gabriel et Charles Voisin. Originaires de Lyon, ils vinrent à Paris pour construire des aéroplanes, à une époque relativement récente, mais qui paraît déjà bien lointaine si l'on mesure le temps aux progrès accomplis. Peu de personnes croyaient alors au plus lourd que l'air et les récits des prouesses à demi

secrètes des frères Wright en Amérique ne rencontraient guère que des sceptiques et faisaient à beaucoup l'effet d'un gigantesque canard d'outre-Atlantique, malgré la publication de détails sur leurs appareils dans l'*Aérophile*.

Quelques-uns cependant conservaient la foi des Penaud et des Lilienthal, et croyaient aux résultats acquis par les Wright ; on doit citer au premier rang le capitaine Ferber et M. Ernest Archdeacon. C'est celui-ci, bien connu comme Mécène de l'aviation, qui soutint les débuts des frères Voisin dans leurs expériences de vol plané (Berck-sur-Mer[1], 1904). Plusieurs années de patientes études les conduisirent à un type véritablement pratique d'aéroplane biplan, dont deux exemplaires à peu près identiques, montés par Henri Farman et Delagrange, établirent les premiers records officiellement constatés en Europe[2] (citons notamment le prix Deutsch-Archdeacon, pour le kilomètre, gagné par Henri Farman le 13 janvier 1908 ; le prix Armengaud, pour le quart d'heure, gagné par le même, 6 juillet 1908 ; les vols de Delagrange, à Rome, en mai 1908, etc.). C'est avec ce même appareil Voisin qu'Henri Farman accomplit le premier voyage aérien au-dessus de la campagne (Châlons à Reims, 30 octobre 1908) ; c'est avec des appareils analogues que plusieurs aviateurs ont réalisé en 1909 de superbes performances (Rougier, Paulhan, etc.). Il ne

1. Expériences sur la Seine, le 8 juin 1905, sur le lac de Genève (Evian, sept. 1905).

2. Nous faisons ici abstraction du vol de 220 mètres exécuté par Santos Dumont, à Bagatelle, le 11 novembre 1906.

peut entrer dans notre plan de donner le détail des diverses modifications de détail apportées à chaque appareil suivant les désirs particuliers de chaque pilote ; plusieurs de ces modifications ont d'ailleurs été abandonnées [1] ; de plus importantes ont été réalisées par Henri Farman et son frère Maurice Farman, qui ont créé un type assez différent du Voisin pour qu'il vaille d'être mentionné à part (voir plus bas, fig. 18).

Mais ces diverses modifications ont laissé subsister les caractéristiques principales du *Voisin ;* on a pu reprocher à cet appareil de manquer de légèreté et de souplesse ; par contre, il a montré des qualités exceptionnelles de robustesse, de stabilité et d'endurance ; il a été, d'autre part, une création vraiment originale ; ce sont ces mérites qu'a récompensés l'Académie des Sciences, en partageant, sur le rapport de M. Emile Picard, le prix Osiris de 100.000 francs, entre Gabriel Voisin et Louis Blériot.

Voici la conclusion du rapport de M. Emile Picard :

« Quelque timides que doivent paraître un jour les essais actuels, l'histoire de l'aviation réservera une page aux voyages au long cours effectués pour la première fois en 1908. Aussi la commission du prix Osiris vous propose-t-elle à l'unanimité de partager, en parties égales, le prix entre M. Gabriel Voisin et M. Louis Blériot. »

L'ossature du biplan Voisin est formée d'un bâti, sorte de carcasse en bois grossièrement

1. C'est ainsi qu'Henri Farman avait pour quelques essais transformé son biplan en triplan ; il renonça vite au plan supplémentaire.

prismatique, relativement courte, d'environ 4 mètres de longueur. A ce bâti sont fixés les organes essentiels : surfaces portantes principales, moteur et hélice, siège du pilote et leviers, gouvernail d'avant, châssis et roues pour le lancement ; la queue ou cellule arrière seule ne lui est pas fixée directement, mais par l'intermédiaire des surfaces portantes principales ou cellule avant.

Le bâti se termine net à l'arrière de la cellule centrale formée par les deux grands plans sustentateurs ; c'est là qu'est fixée l'hélice, directement actionnée par le moteur ; de part et d'autre de l'hélice se trouvent des tiges de bois entretoisées de montants verticaux et de croisillons d'acier qui relient la cellule arrière à la cellule avant ; l'hélice évolue ainsi dans l'espace compris entre ces tiges immédiatement contre le bâti, dont le prolongement jusqu'à la cellule arrière aurait rendu impossible cette disposition.

Dans la figure 17 comme dans toutes celles qui représentent des photographies d'appareil en plein vol, l'hélice n'est pas visible, la rapidité de son mouvement ne lui permettant pas d'être fixée sur la plaque photographique (ni d'être perçue par les spectateurs).

La cellule centrale est formée de deux plans parallèles, légèrement incurvés ; leur distance est de $1^{m},50$, leur envergure de 10 mètres, leur profondeur (d'avant en arrière) de 2 mètres ; la surface de chacun d'eux est ainsi de 20 mètres carrés et la surface portante totale de 40 mètres carrés (à laquelle doit s'ajouter la surface portante de la queue, qui est loin d'être négligeable

dans cet appareil). Les plans parallèles son
réunis par des entretoises et par des *plans ver*

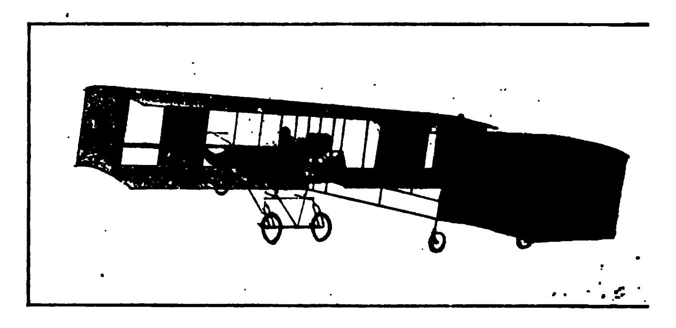


Fig. 17. — Biplan Voisin (Paulhan) juillet 1909.

ticaux, (d'où le nom de *cellule* donné à l'en
semble) ; ces plans verticaux sont formés d'étoff



Fig. 18. — Biplan Farman (mars 1910).

caoutchoutée tendue ; ils sont au nombre d
quatre ; la surface de chacun d'eux étant d'env

; mètres carrés (puisque la distance des sur-
s portantes est 1^{m},50 et la profondeur 2 mètres),
'oit que leur surface totale est d'environ
ıètres carrés, auxquels s'ajoutent les surfaces
ogues de la queue. C'est cette très grande
rficie des *surfaces verticales* (environ
ıètres carrés pour 50 mètres carrés de sur-

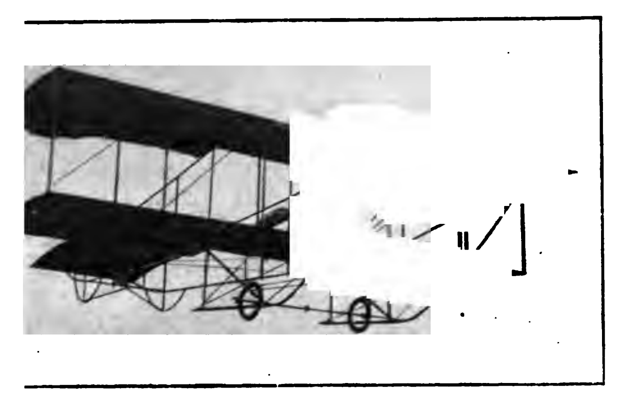


Fig. 19. — Biplan Sommer (avril 1910).

horizontale) qui est une des caractérisques
ntielles des appareils Voisin [1].

Au moment où nous corrigeons les épreuves, nous apprenons
s frères Voisin viennent de construire un nouvel appareil sans
ıs verticales, mais avec ailerons biplans ; cette modification
: surtout inspirée par le désir d'augmenter la vitesse. Les
ırs sportifs conduisent en effet, par leurs règlements habituels,
ner à une faible augmentation de vitesse (81 kilomètres à
:, par exemple, au lieu de 80) une importance pécuniaire très
érable. Il serait désirable que les organisateurs des meetings
ion créent aussi des prix importants pour récompenser d'autres
:s, par exemple la possibilité d'élever un poids considérable.

La disposition et le nombre de ces cloisons verticales ont d'ailleurs beaucoup varié avec les appareils ; certains aviateurs, tels que Henri Farman, les ont supprimés dans la cellule avant, ne les conservant que dans la cellule arrière (fig. 18). Sommer les a même entièrement supprimées (fig. 19).

La queue ou cellule arrière se compose de deux plans analogues à ceux qui forment la cellule principale ; leur écartement est le même (1m,50 et leur profondeur est aussi la même (2 mètres) ; mais leur largeur est beaucoup moindre (3 mètres seulement au lieu de 10 mètres) ; leur surface totale est donc de 12 mètres carrés (dans certains appareils 10m²,80, l'envergure étant 2m,70 au lieu de 3 mètres) ; les plans verticaux qui les réunissent, au nombre de deux seulement (aux deux extrémités) ont une surface totale de 6 mètres carrés ; enfin, un plan vertical mobile (tandis que les précédents sont fixes) est placé au milieu de la cellule arrière ; il peut tourner autour d'un axe vertical et joue le rôle de gouvernail de direction.

La distance de la cellule arrière à la cellule principale a varié de 3 à 4 mètres suivant les appareils.

Le gouvernail de profondeur, ou équilibreur monoplan, est situé, comme nous l'avons dit, à l'extrémité avant du corps ; cette extrémité se termine en pointe ; plus exactement, la surface inférieure et la surface supérieure viennent se réunir suivant une arête horizontale ; l'ensemble est recouvert de tissu caoutchouté, de manière à

diminuer la résistance qu'opposeraient à l'air les nombreuses entretoises et le corps du pilote. Les dimensions du gouvernail de profondeur ont beaucoup varié suivant les appareils et au cours des essais; sa surface totale est toujours très inférieure à celle des cellules; elle ne dépasse pas 4 ou 5 mètres carrés, soit le dixième environ des surfaces portantes.

Indiquons enfin, pour terminer cette description sommaire, que les surfaces portantes principales sont concaves, le rapport de la flèche de l'arc à la corde étant environ un quinzième; la valeur de la corde étant 2 mètres, la flèche maximum est de 13 à 14 centimètres; cette flèche maximum n'est d'ailleurs pas au milieu, mais en avant, à peu près au tiers de la longueur. Nous dirons plus loin quelques mots du rôle de la concavité des surfaces.

LE BIPLAN WRIGHT. — Nous ne mentionnons que pour mémoire les premiers appareils Wright sans moteur; c'est le 17 décembre 1903 que fut effectué le premier vol mécanique [1], sa durée fut de 59 secondes et le chemin parcouru de 260 mètres, ce qui correspond à 16 kilomètres à l'heure environ; le vent contraire était évalué à 32 kilomètres à l'heure, ce qui porte à 48 kilomètres la vitesse relative par rapport à l'air. Le moteur n'était que de 16 chevaux et l'essai n'était pas absolument concluant, vu l'importance

1. Ce vol de 59 secondes fut le quatrième et le plus long de ceux qui furent effectués ce jour-là; le premier avait duré douze secondes.

du vent contraire. Aussi les inventeurs introduisirent quelques modifications dont la plus importante était le remplacement du moteur de 16 chevaux par un moteur de 25 chevaux. C'est près de Dayton (Ohio) en 1905 que les Wright firent leurs premiers vols de quelque durée. Au milieu de l'année 1908, Wilbur Wright vint au camp d'Auvours exécuter la série de vols triomphals que l'on sait (fig. 16, p. 89).

Beaucoup de lecteurs auront vu l'appareil Wright. Simplicité extrême des moyens, telle est la première impression de tout spectateur. A y regarder de près, néanmoins, on constate que, sur bien des points, cette simplicité n'est pas « primitive », mais résulte au contraire de l'étude approfondie des conditions complexes à réaliser. Par exemple, il est clair qu'un aéroplane doit pouvoir résister sans chavirer à des couples divers, suivant la direction du vent, l'inclinaison de la trajectoire et sa courbure ; des gouvernails biplans, parallèles respectivement à deux plans rectangulaires passant par l'axe de l'appareil, contrebalancent l'effet de ces couples. Un couple utile peut aussi être déterminé par le gauchissement des ailes. Dans certains cas, il sera nécessaire de développer à la fois deux couples de réaction rectangulaires ; on y parviendra avec *un seul levier*, grâce à une transmission genre Cardan, d'une très grande simplicité ; l'aviateur pourra ainsi, d'un seul mouvement d'une obliquité calculée, conserver son équilibre dans le virage. Les toiles qui recouvrent les ailes seront simplement clouées, à l'aide de semences, et dis-

posées de biais sur les deux grands plans, — carcasses formées de deux longerons plats entretoisés de 34 nervures, nervures qui peuvent se prêter au gauchissement. Cette disposition nécessite de nombreuses coutures, mais offrant moins de résistance au gauchissement, évite dans ce cas la formation de rides et répartit la fatigue des fils. Les montants seront fixés et articulés de manière très ingénieuse à l'aide d'un simple piton qui passe dans un crochet goupillé, et les haubans en fil d'acier seront adroitement organisés pour ne pas comporter de tendeurs. Pour articuler le gouvernail avant : deux joues en tôle, une pointe recourbée. Partout : rusticité méthodique et pratique.

Tout le biplan Wright est porté sur une longue ossature de bois, recourbée à sa partie inférieure pour former patin de traîneau. Vers le milieu de l'ossature, se déploient l'un au-dessus de l'autre les deux grands plans de voilure, 12^{m},50 sur 2 mètres, concaves (la flèche est d'environ un vingtième, soit 10^{cm}), reliés l'un à l'autre par des montants verticaux, et distants l'un de l'autre de 1^{m},80. A l'avant est monté le gouvernail de profondeur : deux petites surfaces horizontales parallèles ayant le huitième environ des surfaces principales, reliées comme elles par des montants qui portent en outre deux petites surfaces verticales semi-circulaires. A l'arrière, le gouvernail de direction : deux plans verticaux solidaires, mobiles autour d'un axe vertical. Pas de queue empennée. Le moteur est placé directement sur le plan sustentateur inférieur, à côté

du siège rudimentaire du pilote. Il commande par des chaînes rigides les deux hélices, *tournant en sens contraire*, de telle manière que les couples de réaction s'annulent rigoureusement. Ces hélices sont placées symétriquement de part et d'autre de l'ossature, immédiatement derrière le grand biplan.

La longueur totale de l'appareil, de l'extrémité d'un gouvernail à l'extrémité de l'autre, est d'environ 9 mètres. L'envolée de l'appareil est généralement aidée [1] par la chute d'un poids de 700 kilogrammes, monté en haut d'un pylône de 6 mètres de hauteur et ayant une chute utile de 5 mètres. En avant du pylône un rail est posé sur le sol et porte un chariot relié à la poulie du pylône. L'aéroplane est posé sur le chariot. Tandis que le moteur est mis en marche, rendu libre par le déclic du poids, le chariot est entraîné. Avant l'arrivée au bout du rail, l'appareil, que l'air frappe en dessous, prend son essor. Il existe deux leviers : l'un commande le gouvernail de profondeur, l'autre commande *à la fois* le gauchissement du grand biplan et le gouvernail de direction. Le premier levier sert surtout dans la marche en ligne droite ; le deuxième est utilisé pour les virages ; sa manœuvre est délicate, parce qu'il est à deux degrés de liberté. Pas de pédales, de manettes, on coupe l'allumage avec un fil qu'on pousse en inclinant le corps en avant.

1. Plusieurs appareils Wright ont pu s'envoler sans le secours du pylône. Les patins sont, dans ce cas, remplacés par des roues.

Le monoplan Blériot. — Plus que tout inventeur, Blériot a varié les types de ses appareils. Il a passé d'un procédé de stabilisation à un autre, a transporté le pilote et le passager, primitivement au-dessus du plan sustentateur, au-dessous de ce plan ; il a modifié la position du centre de gravité, essayé de démultiplier l'hélice (Blériot XII, fig. 20), employé successivement



Fig. 20. — Monoplan Blériot XII (juillet 1909).

plusieurs moteurs. Nous décrirons brièvement ici le Blériot XI, qui a accompli la traversée de la Manche, le 25 juillet 1909[1].

Le corps fuselé est formé de quatre longerons dessinant ses arêtes, entretoisés de montants de frêne maintenus rigides par un croisillon de fils

1. Cet appareil figure actuellement dans les collections du Conservatoire des Arts et Métiers. Son aspect général est analogue à celui du monoplan Tellier (fig. 22 p. 107).

d'acier dont on peut régler la tension. Les flancs sont entoilés jusqu'à près de la moitié de sa longueur. Il a huit mètres de long et se termine à l'avant par un cadre vertical rectangulaire auquel sont fixés le moteur et l'hélice. Ce cadre vertical est, en outre, solidement relié au corps fuselé par de robustes traverses de bois, obliques, partant de son extrémité inférieure. Il repose par un système élastique, formé essentiellement de quatre cordons Blériot en caoutchouc, sur deux roues d'atterrissage. Une troisième roue est placée à l'arrière, dans le plan de symétrie de l'appareil et reliée directement au corps fuselé. Sur le corps fuselé, à l'avant, sont montées les ailes, légèrement incurvées, arrondies aux extrémités et susceptibles de gauchissement. Tendues sur les deux faces de tissu caoutchouté, elles ont $7^{m},20$ d'envergure et seulement 12 mètres carrés de surface. Leur angle d'attaque est d'environ 7°. Leur membrure est soigneusement construite en acajou et peuplier, avec des nervures parallèles très rapprochées.

L'hélice et le moteur sont donc à l'avant. A l'arrière se trouve un empennage fixe horizontal, de deux mètres carrés, et, de chaque côté de cet empennage fixe, un équilibreur ou gouvernail de profondeur tournant autour d'un axe horizontal situé dans le plan de l'empennage fixe et ayant un peu moins d'un mètre carré comme surface. A l'arrière également existe un gouvernail vertical de direction. Le pilote, assis dans le corps fuselé, entre les deux ailes cette fois, commande le gauchissement des ailes et les équilibreurs par

un levier de direction monté sur cardan. Le gouvernail vertical est commandé par une barre au pied. Le tout forme un ensemble extrêmement souple, docile et léger.

LE MONOPLAN ANTOINETTE. — Un long corps fuselé, développé en queue à l'arrière, flanqué de deux grandes ailes se relevant légèrement en un V très ouvert, voici l'aspect d'ensemble de l'Antoinette.

Le corps fuselé, ossature de l'appareil, est en forme de carène triangulaire en bois (longueur, 8 à 10 mètres). Son avant est terminé par une étrave fendant l'air, son arrière porte des empennages horizontaux et verticaux qui forment la queue. De robustes entretoises maintiennent transversalement le corps de l'appareil. A peu près au tiers, à partir de l'avant, s'élève un mât vertical qui traverse le corps et supporte, à l'aide d'une chappe, les haubans qui soutiennent les ailes.

Les ailes ont une envergure de $12^m,80$. Elles sont en bois léger, formées de nervures transversales sensiblement parallèles et de petites fermes perpendiculaires aux précédentes. Leur épaisseur, au milieu, est de 15 à 25 centimètres, leur courbure est à peu près un arc de cercle, leur angle d'attaque est de 4°. Non entoilées, elles ne pèsent pas plus d'un kilogramme par mètre carré. Chacune de leurs surfaces est de 25 mètres carrés. On les entoile sur les deux faces et on emploie, de même que pour le corps, une toile vernie et plusieurs fois poncée, ce qui diminue le frottement. Des montants, les traversant per-

pendiculairement, servent à les raidir au moyen de fils d'acier à tension réglée par des tendeurs.

Le corps repose par un mât et deux arcs boutants sur deux roues parallèles, dont la voie est de $1^m,50$ et dont l'axe est solidaire de l'amortisseur de suspension, amortisseur composé de deux tubes rentrant l'un dans l'autre, un des tubes formant corps de pompe, l'autre piston. Un patin formant crosse à son extrémité, placé sous l'appareil et le dépassant à l'avant de plus d'un mètre, protège l'hélice contre tout choc à l'atterrissage. Il existe un gouvernail de profondeur et un gouvernail de direction placés à l'arrière, l'un en prolongement de l'empennage horizontal de la queue, l'autre en prolongement de l'empennage vertical.

Le moteur est fixé à l'avant, Le pilote se place à l'intérieur du corps dans une nacelle capitonnée située derrière les ailes à une assez grande distance de l'hélice et du moteur. Un volant placé à main droite commande le gouvernail de profondeur ; un volant à main gauche la stabilité transversale ; deux pédales le gouvernail de direction. A portée de la main, deux manivelles règlent respectivement l'avance à l'allumage et la carburation du moteur.

Pour faciliter la stabilisation latérale, les ailes sont construites de manière à permettre leur déformation hélicoïdale. Tandis que les nervures d'avant sont fixes, les nervures d'arrière sont articulées en leur point de rencontre au centre de l'appareil. Les haubans partant du milieu de

chaque nervure d'arrière sont attelés avec des câbles passant sur des poulies et que commande le pilote.

Au départ, le bras vertical de la croix qui forme la base de l'empennage arrière sert de point d'appui à l'appareil.

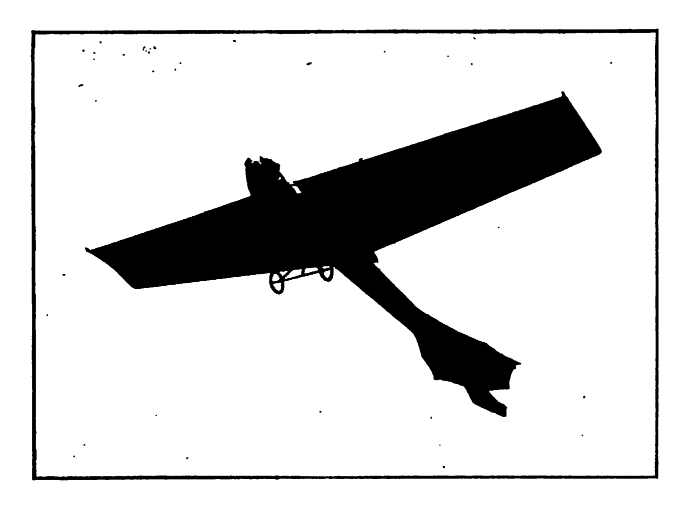


Fig. 21. — Monoplan Antoinette (Latham, décembre 1909).

Les empennages, les gouvernails d'arrière ont une grande efficacité par leur éloignement du centre de gravité. On a pu dire que l'appareil se comportait comme une flèche plombée à l'avant et empennée à l'arrière.

Les appareils que nous venons de décrire sont les plus importants parmi ceux qui ont actuellement fait leurs preuves. Pour donner une idée

plus précise de la variété des appareils, en particulier pour certaines caractéristiques dont nous n'avons pas parlé en détail, nous avons dressé le tableau méthodique des appareils engagés à la grande semaine de Reims (août 1909) qui est, à l'heure où nous écrivons, le meeting d'aviation ayant réuni le plus de concurrents. Nous avons classé d'abord les monoplans, ensuite les biplans ; pour chacune de ces grandes catégories, nous donnons d'abord une description sommaire des principaux types, ensuite un tableau de leurs caractéristiques numériques.

CARACTÉRISTIQUES DES APPAREILS ENGAGÉS A REIMS EN 1909.

Monoplans.

R. E. P. — 4 appareils (2 pilotés par R. Esnault-Pelterie, 1 par M. Guffroy, 1 par E. Laurens), une place, stabilisation par gauchissement, châssis à roues, amortisseur oléo-pneumatique, moteur R. E. P. à 7 cylindres en étoile, refroidissement à air, allumage magnéto, hélices R. E. P. à quatre branches.

Antoinette. — 4 appareils (pilotés par H. Latham, R. Demanest, Ruchonnet et G. Bailly) 2 places, stabilisation par gauchissement, châssis à patins-roues, amortisseur pneumatique, moteur Antoinette à 8 cylindres en V, refroidissement à eau, allumage accumulateurs, hélices Antoinette à 2 branches.

Blériot. — 4 appareils dont 2 *a*, *b*, pilotés par L. Blériot et 2 appareils C, type traversée de la Manche, l'un *c* piloté par Blériot, l'autre *d* par L. Delagrange, dont 2 appareils *b*, *c*, à une place, 2 *a*, *d*, à 2 places ; 2 appareils *a*, *b*, à stabilisation par ailerons et 2 type C à stabilisation

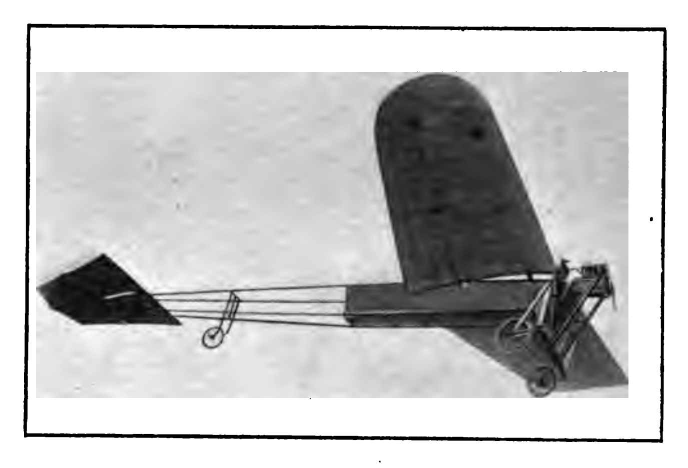


Fig. 22. — Monoplan Tellier (Dubonnet, avril 1910).

par gauchissement. Châssis à roues, amortisseur à ressorts, 3 des appareils *a*, 2 C, à moteur Anzani, 3 cylindres à 60 degrés et 1 appareil *b* à moteur E. N. V. à 8 cylindres en V ; 3 des appareils *a*, 2 C, à refroidissement, à air, 1 *b* à eau ; 3 des appareils *a*, 2 C, à allumage par accumulateurs, un *b* par magnéto ; hélices Chauvière à 2 branches.

Caractéristiques numériques :

	R. E. P.	ANTOINETTE	BLÉRIOT
Surface portative (mètres carrés).	20	3 ap. : 50 1 ap. : 42	*a*, *b*, 22 ; C, 14
Envergure (décimètres)	104	128	*a*, *b*, 100 ; C, 86
Longueur (décimètres)	86	115	*a*, *b*, 70 ; C, 78
Poids (kilogrammes)	460	520	*a*, 550 ; *b*, 620 ; C, 340
Charge (kilog. par mètre carré) . .	23	3 ap. : 10.4 1 ap. : 12.4	*a*, 25 ; *b*, 28 ; C, 24
Puissance indiquée (chevaux).	35	50	*a*, 40 ; *b*, 50 ; C, 25
Puissance en chevaux par tonne d'aéroplane . .	76	96	*a*, 73 ; *b*, 80 ; C, 74
Diamètre de l'hélice (centimètres)	200	220	*a*, *b*, 270 ; C, 208
Vitesse en tours par minute. . .	1.400	1.100	*a*, *b*, 500 ; C, 1.400

Biplans.

Wright. — 5 appareils (dont 2 pilotés par le comte de Lambert, 2 par P. Tissandier, 1 par

L. Schreck), deux places, stabilisation par gauchissement, châssis à patins, moteur Wright à 4 cylindres verticaux, refroidissement à eau, allumage magnéto, hélices Wright à deux branches.

Voisin. — 9 appareils (pilotés par I. Gobron, Delagrange, E. de Rue Ferber, Paulhan, E. Bunau-Varilla, H. Rougier, H. Fournier, Sanchez-Beda et Legagneux), 2 places, stabilisation automatique, châssis à roues, amortisseurs à ressorts, moteurs Antoinette à 8 cylindres en V (pour Delagrange, E. de Rue Ferber et Sanchez-Besa), Gobron à 4 cylindres en X (Gobron et Legagneux), Gnome à 7 cylindres rotatifs (Paulhan), E. N. V. à 8 cylindres en V (E. Bunau-Varilla), Renault à 8 cylindres en V (H. Rougier), Itala à 4 cylindres verticaux (H. Fournier), refroidissement à eau, (sauf pour Paulhan et H. Rougier qui ont le refroidissement à air) ; allumage accumulateurs (pour Delagrange, E. de Rue Ferber, H. Rougier et Sanchez Besa), magnéto (Paulhan, E. Bunau-Varilla et H. Rougier) deux magnétos (1 Gobron et Legagneux), hélices Voisin à 2 branches.

Farman. — 4 appareils (dont 2 : *a* et *b* pilotés par H. Farman, 1 par R. Sommer, 1 par C. Cockburn), 2 places, stabilisation par ailerons, châssis à patins roues, amortisseur à ressorts ; 2 moteurs Vivinus à 4 cylindres verticaux (Sommer et *a* Farman), 2 moteurs Gnome à 7 cylindres, rotatifs (*b* Farman et Cockburn) ; 2 refroidissements à eau (Sommer et *a* Farman) 2 à air (*b* Farman et Cockburn) allumage magnéto, hélices Chauvière à 2 branches.

	1 WRIGHT	2. VOISIN	3. FARMAN	4 ARIEL	5 BRÉGUET	6 A. A. E.
Surface portative (m^2) . . .	50	50	40	40	50	24
Envergure (décimètres) . .	125	115	100	110	127	88
Longueur (décimètres) . . .	93	120	120	93	115	85
Poids (kilogrammes)	450	550	550	450	700	250
Charge (kilog. par m^2) . . .	9	11	13,75	11,25	14	10,4
Puissance indiquée (chx . .	25	pour 6 ap. : 50 ; pour 2 ap. (Gobron, Rougier, Legagneux) : 55.	pour 3 ap. : 50 ; pour *a* Farman : 35.	25	55	25
Puissance en chevaux par tonne d'aéroplane	55	pour 7 ap. : 91 ; pour 2 ap. (Gobron et Rougier) : 100.	pour 3 ap. : 91 ; pour *a* Farman : 64.	55	78	100
Diamètre de l'hélice (centimètres)	250	200	260	250	250	180
Vitesse en tours par minute.	450	pour 4 ap. : 100 pour 3 (Paulhan, Buneau-Varilla, Rougier) : 1.200 ; pour 2 (Gobron et Legagneux) : 1.150.	pour 2 ap : 1.100 ; Sommer et *a* Farman : 1.200.	450	800	1.300

Ariel. — 2 appareils, pilotés par E. Lefebvre et X, 2 places, stabilisation par gauchissement, châssis à patins, moteur Wright à 4 cylindres verticaux, refroidissement à eau, allumage magnéto, hélices Wright à 2 branches.

Bréguet. — 1 appareil piloté par L. Bréguet, 2 places, stabilisation par gauchissement, châssis à roues, amortisseurs à ressorts, moteur Renault à 8 cylindres en V, refroidissement à air, allumage magnéto, hélices Bréguet à 2 branches.

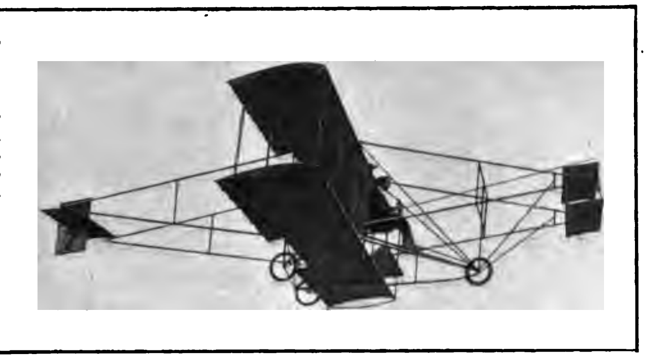


Fig. 23. — Biplan Curtiss A. A. E. (de Riemsdyk, mars 1910).

A. A. E. — 1 appareil piloté par J.-H. Curtiss, 2 places, stabilisation par ailerons, châssis à roues, amortisseur à ressorts, moteur Curtiss à 4 cylindres, refroidissement à air, allumage accumulateurs, hélices Curtiss à 2 branches (fig. 23)[1].

1. Pour les descriptions d'appareils et leurs caractéristiques numériques nous avons utilisé, outre diverses revues d'aviation (l'*Aéronaute*, la *Revue aérienne*, le bulletin de la *Ligue nationale aérienne*), l'excellent ouvrage de M. L. Marchis : le *Navire aérien*.

CHAPITRE V

LA MANŒUVRE DE L'AÉROPLANE

La stabilité.

On sait que l'on distingue les oscillations d'un bateau en deux catégories, le roulis et le tangage : dans le roulis, le bateau oscille autour d'un axe dirigé dans le sens de sa longueur, de sorte qu'il s'incline tantôt à droite, tantôt à gauche ; dans le tangage, il oscille autour d'un axe perpendiculaire au premier, c'est-à-dire dirigé suivant la largeur du bateau ; dans ce mouvement, l'avant et l'arrière s'inclinent alternativement. Pour l'aéroplane, il y aura lieu de considérer aussi le roulis, ou inclinaison alternative des ailes droite et gauche ; le tangage, ou inclinaison alternative de l'avant et de l'arrière ; et enfin, un troisième élément, la gyration autour d'un axe vertical. Dans le cas de la navigation maritime, ce dernier élément n'est pas à considérer, car une expérience séculaire nous a appris à construire des bateaux pour lesquels ce phénomène ne se produit pas ; nos connaissances sur ce sujet sont d'ailleurs surtout empiriques. Il y a donc lieu de considérer pour l'aéroplane trois sortes de stabi-

lité : la stabilité contre le roulis ou stabilité latérale ; la stabilité contre le tangage ou stabilité longitudinale ; la stabilité contre la gyration ou stabilité de route.

Nous étudierons en détail dans la note II, les conditions mécaniques de ces diverses stabilités ; à défaut de formules précises, nous devons nous borner ici à quelques considérations qui ne peuvent prétendre à la rigueur mathématique d'une théorie mécanique.

STABILITÉ LATÉRALE. — Nous ne nous occuperons que de la stabilité latérale en marche normale, réservant la question des virages. Il est tout d'abord nécessaire que l'appareil soit bien *équilibré*, c'est-à-dire que la position dans laquelle son plan de symétrie est vertical soit une *position d'équilibre ;* il faudra s'occuper ensuite de la *stabilité* de cet équilibre, c'est-à-dire de la tendance que l'appareil doit avoir à revenir spontanément vers cette position d'équilibre s'il en a été écarté momentanément par une cause quelconque ; à la stabilité se rattache la notion de *sensibilité* qui doit en être cependant distinguée ; l'appareil ne doit pas être trop sensible, c'est-à-dire qu'une faible cause perturbatrice ne doit produire qu'une faible déviation à partir de la position d'équilibre.

Occupons-nous d'abord de la condition d'équilibre ; si l'on suppose l'appareil en marche normale et s'il n'y a pas de vent oblique, l'action du vent sur les deux ailes est la même et par suite la condition d'équilibre est évidemment que le

centre de gravité soit dans le plan de symétrie. Il faut bien observer que ce raisonnement n'est correct que si l'appareil propulseur est symétrique lui-même par rapport à ce plan, condition réalisée dans le type Wright.

Dans les appareils à une seule hélice, cette condition de symétrie n'est pas remplie, parce que l'hélice tourne nécessairement dans un sens déterminé; par exemple, tourne dans le sens des aiguilles d'une montre pour un observateur vers lequel se dirige l'appareil ; sa symétrique par rapport à un plan ou, si l'on veut, son image dans une glace, tournerait en sens inverse et ne coïncide donc pas avec elle[1] ; l'hélice introduit donc une dissymétrie par son mouvement ; au point de vue mécanique, il est clair qu'une rotation de l'hélice dans un sens doit produire par réaction une tendance à la rotation de l'appareil en sens opposé[2], c'est-à-dire que si l'hélice tourne dans le sens indiqué tout à l'heure, un observateur qui verra venir l'aéroplane vers lui devra constater une tendance de l'appareil à tourner en sens inverse des aiguilles d'une montre, c'est-à-dire un abaissement de l'aile qui est à sa gauche, c'est-à-dire de l'aile qui est à la droite du pilote.

D'ailleurs, une fois le régime régulier établi, il ne se produira plus de couple accélérateur et

1. Il suffit d'avoir observé l'image d'une montre dans une glace pour savoir que, dans cette image, les aiguilles tournent en sens inverse du sens habituel.

2. Ceci se traduirait analytiquement par l'équation des moments cinétiques par rapport à l'axe passant par le centre de gravité de l'appareil et parallèle à l'axe de rotation de l'hélice.

un état d'équilibre pourra s'établir, dans lequel l'appareil supposé parfaitement symétrique, sera incliné *vers la droite du pilote* ou, plus brièvement, *vers la droite*. Cette inclinaison présenterait de multiples inconvénients ; on pourrait y remédier par un petit déplacement du pilote[1] (ou d'un poids quelconque voisin de lui) immédiatement après la mise en marche ; on préfère généralement introduire une petite masse compensatrice placée, dans notre hypothèse, à la gauche du pilote ; cela revient à contrebalancer une dissymétrie par une autre dissymétrie. L'inconvénient de cette méthode est que l'appareil est dissymétrique une fois le moteur arrêté, ce qui pourrait avoir des inconvénients pour la descente planée si cette dissymétrie n'était pas faible.

C'est alors pendant la descente, moteur arrêté, que le pilote doit compenser cette dissymétrie par un déplacement de son corps ou par une manœuvre dissymétrique des ailes. Ceci se rattache à la stabilité latérale proprement dite, dont nous allons maintenant parler.

Nous supposons désormais que la position dans laquelle le plan de symétrie est vertical est une position d'équilibre ; il s'agit de rechercher si cet équilibre est stable, c'est-à-dire si l'appareil tend à reprendre spontanément cette position lorsqu'il en a été écarté par une cause accidentelle quelconque.

Supposons donc que l'appareil s'incline, par

1. Il est clair, en effet, que nous avons implicitement écarté l'hypothèse d'un tel déplacement.

exemple, vers la droite du pilote, en restant symétrique par rapport au plan de symétrie qui s'incline par conséquent lui aussi. S'il n'y a pas de vent latéral, il est clair que la seule modification produite dans les actions du vent sur les ailes est une inclinaison de la poussée, mais les poussées sur les deux ailes restent symétriques, et il n'y a par suite aucune raison pour que l'appareil se relève. L'inclinaison de la poussée aura pour conséquence une dérive de l'appareil vers la droite, de sorte que le phénomène devient rapidement plus complexe et ne peut plus être analysé sans le secours des équations de la mécanique[1] ; mais, à supposer même que la stabilité latérale puisse être ainsi obtenue, *à la suite de la dérive,* ce ne serait pas là une solution très heureuse, puisqu'elle exigerait une déviation préalable de la direction ; il est plus naturel, pour de petits écarts du moins, d'admettre que le pilote doit arriver à rétablir l'équilibre par un déplacement convenable de son corps ; il est facile d'ailleurs de constater que la tendance naturelle à maintenir le corps vertical conduit précisément, au moins d'une manière qualitative, au redressement de l'appareil. La stabilité latérale deviendra donc rapidement, sinon automatique, du moins instinctive, c'est-à-dire que les réflexes du pilote seront aisément éduqués à la maintenir. Pour des déviations plus importantes, dues par exemple à une rafale imprévue, il y aurait lieu d'utiliser un mécanisme agissant d'une

1. Voir la note I.

manière dissymétrique sur les ailes : nous dirons un mot des mécanismes de ce genre (ailerons, gauchissement), à propos des virages. L'expérience montre d'ailleurs que leur manœuvre est assez délicate, car l'inclinaison exagérée d'une des ailes vers le sol a causé d'assez nombreux accidents d'aéroplane.

STABILITÉ LONGITUDINALE. — Pour marcher dans des conditions données, un aéroplane doit avoir une certaine inclinaison sur l'horizon[1], c'est-à-dire que le plan moyen des ailes est incliné d'un angle d'ailleurs assez faible (10 degrés environ). Si cet angle diminuait, l'appareil tendrait à piquer du nez ; s'il augmentait, il tendrait à se cabrer : ces deux accidents contraires sont également dangereux ; la stabilité longitudinale consistera à conserver la bonne inclinaison, ou plus exactement à n'avoir, sous l'action des causes accidentelles, que de faibles oscillations au voisinage de cette bonne inclinaison.

Supposons, par exemple, que l'appareil se cabre ; la résistance de l'air fera un angle plus grand avec la verticale, c'est-à-dire que sa composante horizontale ou *traînée* grandira par rapport à sa composante verticale ou *poussée* ; comme celle-ci reste sensiblement égale au poids de l'appareil, il y aura tout d'abord diminution de la vitesse ; il en résultera donc une diminution

1. Nous supposons, pour abréger, que le vent est horizontal et que la vitesse de l'appareil est aussi horizontale ; nous omettons aussi une discussion sur la stabilité du régime de marche, que l'on trouvera dans la note I.

de la traînée due à l'action de l'air sur les parties fixes de l'appareil (résistances nuisibles). La question est donc de savoir si cette modification des forces horizontales aura pour résultat d'accentuer ou d'atténuer la tendance de l'appareil à se cabrer. Il est évidemment impossible de résoudre cette question sans connaître les détails de construction de l'appareil ; si l'on suppose que la composante horizontale des actions sur les ailes est au-dessus du centre de gravité, tandis que la composante horizontale des actions sur les autres parties est au-dessous, il est clair que les deux modifications que nous avons relevées tendront toutes deux à cabrer davantage l'appareil ; ce serait le contraire si les dispositions étaient inverses.

Mais l'influence que nous venons d'étudier est généralement faible par rapport au changement de position du centre des pressions verticales ; ce phénomène est, lui aussi, très variable avec le type d'appareil, nous nous contenterons de l'étudier dans les appareils Voisin, caractérisés par une queue placée à l'extrémité d'un long bras de levier ; les surfaces horizontales de la queue sont moins inclinées sur l'horizon que les ailes principales, de sorte qu'elles sont à peu près *effacées* en marche normale. Si l'appareil se cabre, la modification des pressions de l'air sur la queue est beaucoup plus importante que la modification des pressions sur les ailes. En effet, pour de petits angles, la pression est sensiblement proportionnelle à l'angle : si l'inclinaison de l'aile passe de 10° à 11°, la pression augmente du

dixième de sa valeur ; si l'inclinaison de la queue passe en même temps de 4° à 5°, la pression augmente du quart de sa valeur. Malgré la surface moins étendue de la queue, étant donnée la longueur du bras de levier au bout duquel cette pression agit, on conçoit qu'elle puisse relever la queue, c'est-à-dire empêcher l'appareil de se cabrer. Le même raisonnement prouve que si l'appareil tend à piquer du nez, la diminution très forte de la pression sur la queue, ou même une contre-pression si le vent l'attaque par dessus, aura pour résultat d'abaisser la queue, c'est-à-dire d'entraver la rupture d'équilibre.

La queue ainsi comprise réalise donc la *stabilité automatique longitudinale.*

A défaut de queue stabilisatrice, on peut chercher à régler la stabilité longitudinale de marche au moyen d'un gouvernail de profondeur. Ce gouvernail peut être placé à l'avant ou à l'arrière. Supposons d'abord qu'il soit à l'avant. Si on l'incline vers le haut, la poussée de l'air augmentera sur ce gouvernail, et cette force verticale à l'avant tendra à cabrer encore davantage l'appareil ; le phénomène sera inverse si on l'incline vers le bas. Le gouvernail de profondeur à l'avant est donc un instrument extrêmement sensible, par suite très précieux entre les mains d'un pilote habile et pouvant être très dangereux entre les mains d'un pilote peu expérimenté. C'est l'une des causes qui rendent malaisé l'apprentissage des appareils Wright.

On peut résumer ces propriétés du gouvernail d'avant en le qualifiant de *progressif :* son effet

s'accentue à mesure qu'il se réalise. Au contraire le gouvernail d'arrière est *régressif*, c'est-à-dire que son effet s'atténue par sa réalisation ; il est donc moins sensible, mais moins dangereux. Un gouvernail mixte formé de deux parties symétriques par rapport au centre de gravité et manœuvrées par un même levier aurait un effet constant, indépendant de l'inclinaison.

Nous n'avons pas parlé de l'action de l'air sur les parties de l'appareil autres que les surfaces portantes, car elles sont généralement de faible importance relative, aussi longtemps du moins que l'angle d'attaque a une valeur sensible. Cette action de l'air sur les montants verticaux, les entretoises, le pilote, le moteur, etc., interviendrait dans le cas où l'angle d'attaque deviendrait nul ou extrêmement petit ; la stabilité verticale serait alors assurée si la résultante de ces actions de l'air était *au-dessus* du centre de gravité ; elle tendrait alors à donner une valeur positive à l'angle d'attaque.

STABILITÉ DE GYRATION. — Pour étudier la stabilité de gyration, il importe d'établir une distinction très nette entre le plan vertical de symétrie de l'appareil et le plan vertical dans lequel se déplace son centre de gravité. En marche normale il est clair que ces deux plans coïncident : c'est ce qui a lieu aussi pour la démarche normale de l'homme, d'un animal ou d'un véhicule quelconques. Mais il est clair que cette condition n'est nullement une nécessité logique : un homme peut fort bien, dans la station verticale

normale, la tête droite, fixer une certaine direction et cependant marcher de biais, vers une direction oblique à la première ; la démarche n'est pas élégante, mais est possible. De même, il arrive souvent que les roues d'une voiture dérapent, c'est-à-dire glissent obliquement sur le sol, au lieu de rouler dans la direction qui serait celle de la marche normale de la voiture.

Un aéroplane peut avoir aussi parfois une marche dans laquelle son plan de symétrie ne coïncide pas avec le plan dans lequel se déplace son centre de gravité ; on doit naturellement éviter le plus possible cette anomalie[1]. Pour cela, il est désirable que l'appareil ait de la *stabilité de gyration*, c'est-à-dire tende à reprendre naturellement la position de marche normale où les deux plans verticaux mentionnés tout à l'heure coïncident. Supposez qu'une cause accidentelle ait fait dévier vers la droite (en avant) le plan de symétrie par rapport au plan de marche ; pour qu'il y ait stabilité de gyration, il faut que ce mouvement ait pour conséquence de déterminer un couple de gyration faisant tourner l'appareil en sens inverse autour de la verticale qui passe par son centre de gravité. Le procédé le plus simple pour rendre automatique cette stabilité paraît être l'emploi de parois verticales, mais il importe de discuter avec soin leur position, sinon leur effet pourrait être exactement inverse de celui que l'on recherche. Si par exemple, ces

1. Nous laissons ici de côté le cas du vent oblique ; il est clair que dans l'hypothèse d'un tel vent, il y a lieu de remplacer la trajectoire absolue par la trajectoire relative par rapport au vent.



surfaces verticales étaient exclusivement à l'avant de l'appareil, il est visible que l'action du vent relatif sur ces surfaces aurait pour effet d'accentuer la déviation ; un tel appareil aurait une tendance à faire très rapidement tête à queue, si le pilote ne disposait pas de manœuvres, telles que le gauchissement des ailes, pour contrebalancer l'effet d'une telle surface verticale. Au contraire une surface verticale à l'arrière aura pour effet de s'opposer à la gyration. Une queue en forme de boîte ouverte pour le passage du vent a donc un double effet stabilisateur ; son inconvénient peut être, comme nous le verrons, de rendre la manœuvre plus difficile, en particulier dans les virages.

Entre les deux cas extrêmes que nous venons de mentionner, on peut en imaginer un grand nombre d'autres, où les cloisons verticales sont réparties à l'avant, à l'arrière, ou à la partie centrale ; l'action d'un vent latéral sur l'ensemble de ces parois se réduit sensiblement[1] à une force appliquée en un certain point indépendant de l'inclinaison (faible) de ce vent latéral ; ce point est le *centre de poussée des parois verticales ;* la condition de stabilité automatique de gyration est que ce centre de poussée soit *en arrière* du centre de gravité.

1. En toute rigueur, il y aurait une force et un couple, variables tous deux avec l'inclinaison ; l'hypothèse simplificatrice du texte semble vérifiée avec une approximation suffisante pour les appareils jusqu'ici construits.

Les virages.

LE VOL EN TRAJECTOIRE CIRCULAIRE. — Avant d'étudier le virage proprement dit, c'est-à-dire le passage d'une trajectoire rectiligne à une trajectoire rectiligne de direction différente, il est bon de se rendre compte dans quelles conditions un aéroplane peut décrire une trajectoire circulaire. Cela revient à étudier un ***régime permanent*** avant de se préoccuper du ***régime variable***.

Les anciens croyaient que le mouvement circulaire uniforme, étant *le plus parfait de tous*, se maintenait indéfiniment une fois réalisé ; nous savons maintenant qu'il n'en est rien et qu'un corps animé d'un tel mouvement a une tendance à s'échapper par la tangente : on exprime ce fait en disant que le mouvement circulaire développe une force centrifuge. Pour que le mouvement se maintienne circulaire et uniforme, il faut que cette force centrifuge due au mouvement même soit à chaque instant contrebalancée par une force centripète, c'est-à-dire dirigée vers le centre du cercle décrit par le mobile. C'est ainsi que la Terre décrit sensiblement un cercle autour du soleil : la force centripète est l'attraction newtonienne exercée par le soleil.

Pour qu'un aéroplane décrive un cercle, il est donc nécessaire qu'indépendamment des forces nécessaires à sa sustentation et son équilibre, il soit développé une force dirigée vers le centre du cercle décrit ; cette force pourrait être due,

soit à l'action directe du moteur [1], soit à la réaction de l'air sur les ailes : on a jusqu'ici adopté exclusivement cette seconde solution. Pour que la réaction de l'air sur les ailes ait une composante dirigée vers le centre du cercle, il est nécessaire que l'aile située du côté du centre soit inclinée vers le bas, celle qui est située en dehors étant relevée vers le haut.

Si pour fixer les idées, nous supposons que pour un observateur situé en ballon au-dessus de l'aéroplane, le cercle est décrit en sens inverse des aiguilles d'une montre (virage à gauche), c'est l'aile gauche qui sera abaissée et l'aile droite qui sera relevée. La valeur de l'inclinaison dépend naturellement du rayon du cercle ; contentons-nous d'indiquer, sans faire le calcul, qu'elle atteint normalement une vingtaine de degrés pour des cercles d'une centaine de mètres de rayon.

Il faut se demander maintenant si cette marche circulaire en position inclinée est possible, c'est-à-dire si elle ne développe pas des forces nouvelles, non étudiées dans la marche rectiligne normale. L'analyse complète de cette question ne peut être rendue rigoureuse qu'au moyen du calcul complet pour lequel nous renvoyons, comme il a été déjà dit, à la note I (p. 243); on peut cependant, sans aucun calcul, donner quelques indications qualitatives permettant de se

1. Cette action du moteur pourrait s'exercer soit sur une hélice prenant son point d'appui sur l'air, soit sur une masse agissant par réaction gyroscopique : cette dernière méthode est mentionnée seulement au point de vue théorique.

rendre compte des phénomènes les plus importants.

Laissons de côté ce qui est relatif à la stabilité de gyration, évidemment compromise à chaque instant ; nous admettrons que les organes grâce auxquels cette stabilité est obtenue en marche normale suffisent à l'assurer d'une manière satisfaisante, c'est-à-dire que l'axe de l'appareil fait un angle, sinon nul, du moins constant et faible avec la tangente à la trajectoire.

La question de la stabilité latérale est plus délicate. Le fait que l'appareil décrit un cercle a comme conséquence évidente de rendre inégales les vitesses des deux ailes. Si le rayon du cercle est 100 mètres et si les ailes ont chacune 5 mètres d'envergure, l'extrémité de l'aile droite décrit un cercle de 105 mètres de rayon et l'extrémité de l'aile gauche un cercle de 95 mètres de rayon seulement. Les arcs décrits sur ces cercles étant proportionnels aux rayons, on voit que l'extrémité de l'aile droite parcourt 105 mètres pendant que l'extrémité de l'aile gauche n'en parcourt que 95. Sa vitesse est d'environ 10 p. 100 plus élevée. L'inégalité est moins forte si l'on considère, comme il convient, les centres de figure respectifs des ailes ; les cercles décrits ont comme rayons $102^{m},50$ pour le centre de figure de l'aile droite et $97^{m},50$ pour le centre de figure de l'aile gauche, ce qui fait une différence de 5 p. 100 environ. Mais la résistance de l'air étant proportionnelle au carré de la vitesse, à une vitesse de 5 p. 100 plus élevée correspond une résistance d'environ 10 p. 100 plus élevée. Comme les com-

posantes verticales des poussées sont équivalentes au poids de l'appareil, c'est-à-dire à 400 kilogrammes environ, on voit que la différence de 10 p. 100 correspond un excédent de poussée de 20 kilogrammes environ sur l'aile droite, si les ailes sont symétriquement placées ; c'est beaucoup plus qu'il n'en faudrait, à l'extrémité d'un bras de levier de $2^m,50$, pour compromettre l'équilibre latéral de l'appareil [1]. Il est donc nécessaire de contrebalancer cet effet par un moyen quelconque : le procédé le plus souvent employé consiste à provoquer dans les ailes une certaine dissymétrie de telle manière que l'action de l'air, *à vitesse égale*, ne soit pas la même sur les deux ailes, mais soit plus forte sur l'aile gauche; les deux réactions pourront alors être égales en vertu précisément des différences de vitesse. La dissymétrie peut être provoquée soit par le gauchissement, soit par de petits ailerons mobiles indépendants des ailes et placés à leur extrémité, soit encore par un dispositif permettant de faire varier l'inclinaison sur l'horizon de chacune des ailes indépendamment de l'autre.

On remarquera que nous n'avons pas parlé du gouvernail de direction. Ce gouvernail n'est

1. On peut constater, en passant, que le rapport des poussées est sensiblement égal au rapport des vitesses des extrémités des ailes ; du moment que l'envergure de l'appareil est une faible fraction du rayon du virage, un calcul immédiat montre que le rapport des vitesses des extrémités des ailes est égal au rapport des carrés des vitesses de leurs centres de figures. Cette remarque explique que divers auteurs aient pu arriver à des résultats également corrects en introduisant dans leur théorie du virage, les uns le rapport des vitesses, les autres le rapport des carrés des vitesses.

pas, en effet, indispensable à la marche circulaire uniforme ; son emploi peut être utile pour faciliter la stabilité de gyration dans les appareils ayant d'importantes surfaces verticales et aussi pour amorcer le virage, comme nous le verrons tout à l'heure. Mais il ne faut pas perdre de vue que la force essentielle produisant l'incurvation permanente de la trajectoire est la force centripète développée par l'inclinaison des ailes. L'existence de cette composante a pour effet accessoire de diminuer la composante utile de la réaction, de sorte qu'il faut augmenter l'angle d'attaque pour que l'appareil ne tombe pas. Il en résulte une augmentation de la traînée et par suite, à force égale déployée par le moteur, une vitesse moins grande qu'en marche rectiligne.

Un autre phénomène qui peut jouer un rôle assez important dans le virage est l'effet gyroscopique de l'hélice. On sait que l'on donne le nom de gyroscope à une sorte de toupie de masse assez forte par rapport à ses dimensions et construite avec assez de soin pour qu'on puisse lui imprimer un mouvement de rotation très rapide. Un tel appareil a des propriétés mécaniques fort curieuses qui ont été étudiées à la fois par la théorie et par l'expérience ; la plus caractéristique de ces propriétés peut être mise en évidence par l'observation d'une toupie ordinaire. Imprimons un mouvement de rotation rapide à une telle toupie et posons-la sur un plan horizontal, de telle manière que son axe ne soit pas vertical, mais incliné ; nous constatons que l'effet de la pesanteur n'est pas d'augmenter l'inclinaison de

cet axe jusqu'à ce que la toupie tombe sur le sol, comme il arriverait si elle ne tournait pas ; on constate au contraire que l'inclinaison de l'axe n'augmente pas, mais que cet axe tourne autour de la verticale. L'effet de la pesanteur est donc de donner à l'extrémité de l'axe un déplacement dont la direction est perpendiculaire au plan vertical contenant cet axe, c'est-à-dire au plan de l'axe de rotation et de la force agissante. On a donné à ce phénomène le nom d'*effet gyroscopique;* il consiste, comme nous venons de le dire, en ce qu'une force agissant sur l'extrémité de l'axe d'un gyroscope produit un déplacement perpendiculaire à sa direction. Ce phénomène est très déconcertant quand on cherche à agir avec la main sur un gyroscope en mouvement ; l'axe se déplace dans une direction perpendiculaire à celle de l'effort qu'on exerce sur lui.

L'hélice d'un aéroplane est animée d'un mouvement de rotation très rapide ; il se produira donc un effet gyroscopique dans tous les cas où les déplacements de l'appareil entraîneront une variation de la direction de cet axe de rotation. Cet effet gyroscopique agira comme une force perpendiculaire à l'axe et à son déplacement ; cette force sera donc verticale si le déplacement de l'axe a lieu dans un plan horizontal, c'est-à-dire si l'appareil vire vers sa droite ou vers sa gauche. Si l'hélice est à l'arrière et est dextrorsum, l'effet gyroscopique aura pour conséquence dans un virage à droite, de relever l'arrière de l'appareil, c'est-à-dire de tendre à le faire piquer du nez ; ce sera l'inverse dans un virage à gau-

che. Or nous avons vu que l'on doit augmenter l'angle d'attaque dans le virage ; l'effet gyroscopique sera donc, dans l'hypothèse admise, favorable pour le virage à gauche et défavorable pour le virage à droite. En fait, certains aviateurs virent toujours à gauche et ne sauraient peut-être pas sans danger virer à droite ; il y a, avec certains appareils, une difficulté bien plus grande à décrire un 8 qu'à tourner en cercle dans un sens laissé au choix du pilote.

L'emploi de deux hélices tournant en sens inverses (Wright) annule l'effet gyroscopique ; c'est là un avantage de ce dispositif, qui présente d'ailleurs par contre certains inconvénients.

LE DÉBUT ET LA FIN D'UN VIRAGE. — Un virage peut être décomposé en trois périodes ; le début, la période de mouvement circulaire uniforme et la fin. Nous venons d'étudier la période de régime permanent [1] ; nous allons parler maintenant du début du virage, c'est-à-dire de la transition entre le mouvement rectiligne uniforme et le mouvement circulaire uniforme ; une étude analogue que nous omettrons pourrait être faite sur la fin du virage [2].

Pour *amorcer* le virage, on utilise habituellement le gouvernail de direction qu'on manœuvre comme un gouvernail de navire s'il est situé

1. Dans certains virages, il peut arriver que la période intermédiaire du régime permanent soit très brève ou même n'existe pas.

2. Plus généralement, on pourrait étudier la transition entre deux mouvements circulaires uniformes différents, le cas où l'un des mouvements est rectiligne étant regardé comme un cas particulier.

à l'arrière. Cette manœuvre a pour effet de diriger l'avant de l'appareil du côté vers lequel on désire virer ; dans le virage à gauche, l'aile droite avance par rapport à l'aile gauche. Si ce mouvement est assez rapide, il en résultera une inclinaison vers la gauche qui rendra possible le mouvement circulaire uniforme[1].

Si cet effet est insuffisant, il faudra recourir à d'autres moyens, tels que le gauchissement ou les ailerons, voire même le déplacement du corps du pilote pour produire l'inclinaison initiale nécessaire au virage. Nous ne pouvons entrer dans le détail de cette technique, nécessairement différente suivant les appareils et qui dépend beaucoup non seulement de l'habileté du pilote, mais, si l'on peut dire, de son caractère et de sa nervosité particulière. La simple expérience de la bicyclette, appareil plus simple que l'aéroplane, nous apprend qu'il y a bien des manières de *prendre* un virage donné et combien il y a peu de différence dans certains cas entre la manœuvre correcte et la manœuvre maladroite qui entraîne la chute.

Le gouvernail de direction agit aussi d'une autre manière, à laquelle on pense parfois tout

1. Si, en effet, l'aile droite avance d'un mètre en une seconde par rapport à l'aile gauche, tout se passe comme si sa vitesse était par exemple de 16 mètres par seconde, tandis que la vitesse de l'aile gauche ne serait que de 15 mètres : les poussées sont proportionnelles aux carrés de ces nombres c'est-à-dire à 256 et 225 ; si le poids de l'appareil est précisément $225 + 256 = 481$ kilogrammes, il en résulte un excès de poussée de $256 - 225 = 31$ kilogrammes à droite, d'où relèvement. De plus, le centre de pression est légèrement déplacé vers la droite, ce qui accentue encore cet effet.

d'abord, mais qui n'est pas aussi importante qu'on pourrait le croire. L'orientation de l'appareil étant modifiée, la poussée de l'hélice s'exerce suivant une direction qui n'est plus celle de la trajectoire primitive. *Si la vitesse et l'inertie étaient faibles*, l'appareil se dirigerait à chaque instant dans la direction suivant laquelle il est poussé, et cette action suffirait pour provoquer le virage. C'est ainsi que si un homme ou un cheval traîne à faible vitesse une voiture légère, la direction du véhicule est déterminée à chaque instant par la direction dans laquelle on le tire. Il suffit de faire varier l'action propulsive pour modifier instantanément la trajectoire. Mais il n'en est nullement de même pour un appareil lourd animé d'une grande vitesse ; c'est surtout en vertu de la vitesse acquise qu'il continue sa route et la force propulsive a seulement pour effet d'atténuer la déperdition de vitesse qui serait due aux résistances passives ; il en résulte qu'une modification dans la direction de cette force propulsive n'agit que faiblement sur la direction suivie par l'appareil. Dans le virage de l'aéroplane, la poussée de l'hélice fait tout d'abord un angle faible avec la direction primitive de la marche rectiligne ; cette poussée peut être idéalement décomposée en deux : une force dirigée suivant cette direction primitive et une force dirigée suivant la perpendiculaire à cette direction ; c'est seulement cette seconde force, faible lorsque l'angle de déviation est petit, qui travaille à incurver la trajectoire. Ces indications suffiront sans doute, sans qu'il soit nécessaire d'entrer

dans le détail des calculs numériques, pour que l'on se rende compte que le rôle du gouvernail de direction n'est pas prépondérant dans le virage, du moins dans les appareils actuellement en usage.

Il n'en serait pas de même si l'appareil était pourvu d'une *quille* de grandes dimensions ; un tel appareil pourrait virer à peu près comme un navire sous l'action combinée du gouvernail, de l'hélice et de la quille.

Le rôle du pilote.

Résumons brièvement les manœuvres essentielles que doit exécuter un pilote d'aéroplane. Tout d'abord, il devrait surveiller son moteur; ceci dit surtout pour mémoire car les autres manœuvres l'absorbent généralement assez pour qu'il soit généralement obligé de se contenter d'en constater à l'oreille la panne et de manœuvrer alors en conséquence ; on doit supposer qu'il sera bientôt possible au pilote d'emmener un aide dont le rôle principal sera de s'occuper du moteur.

En marche rectiligne, le pilote doit veiller surtout à la stabilité longitudinale ; l'appareil ne doit, ni piquer du nez, ni se cabrer ; il doit aussi se maintenir à la hauteur voulue[1] au-dessus du sol, malgré les ondulations du terrain. Aussi l'action constante d'une de ses mains sur le levier

1. Cette hauteur est choisie librement par le pilote par des raisons de sécurité et de visibilité du paysage, accessoirement d'obligation sportive ou d'agrément.

qui commande le gouvernail de profondeur est aussi indispensable que la manœuvre continuelle du volant pour le conducteur d'automobile.

Le pilote doit s'occuper aussi de la stabilité latérale et de la stabilité de gyration, dans le cas où cette dernière n'est pas automatique ; il y parvient, soit par des déplacements de son corps pour de faibles déviations, soit par les manœuvres des leviers de gauchissement ou de dispositifs analogues. Ces manœuvres-là paraissent être les plus malaisées à rendre instinctives.

Dans les virages, le pilote doit, en outre des manœuvres précédentes, orienter convenablement son gouvernail de direction et veiller à ne pas exagérer l'inclinaison de l'appareil.

L'expérience a prouvé que l'apprentissage de ces diverses manœuvres, par temps calme, ne présente pas de difficultés excessives ; en fait, la plupart de ceux qui se sont proposés de devenir pilotes y ont réussi. Il n'en est pas de même par la tempête et les aviateurs capables de rester maîtres de leur appareil lorsque le vent souffle en rafales sont jusqu'ici assez rares pour qu'il soit malaisé de savoir si cette possibilité d'évoluer par mauvais temps est due à un don spécial et rare ou si elle pourra être acquise par tous ceux qui joindront le courage à la persévérance.



CHAPITRE VI

LE ROLE DE L'ANGLE D'ATTAQUE

La loi du sinus.

Nous nous sommes contentés jusqu'ici, d'une description et d'une théorie qualitatives des appareils d'aviation ; il convient maintenant de serrer la réalité de plus près et, pour cela, il est indispensable de faire intervenir quelques formules — très simples d'ailleurs — dans lesquelles figure l'*angle d'attaque*, ou angle que font les plans sustentateurs avec les filets d'air qui viennent les frapper ; ou, plus brièvement, avec le *vent relatif*.

Indiquons tout d'abord comment cet angle d'attaque intervient dans les lois de la résistance de l'air ; c'est là un point fondamental, à propos duquel des vues théoriques inexactes ont longtemps prévalu ; c'est un exemple frappant de l'importance essentielle des expériences de laboratoire pour les progrès des applications.

LA LOI DU SINUS ET LA LOI DU SINUS CARRÉ. — Figurons un plan AB soumis à un vent relatif v de direction V ; la parallèle BC à la direction

V fait avec AB un angle aigu α qui est l'angle d'attaque. Si l'on construit le triangle rectangle ACB, la longueur AC est, d'après la définition même du sinus, égale au produit de AB par le sinus de l'angle d'attaque α ; si le plan de section A B a une surface S, la surface qu'il présente au vent, c'est-à-dire sa surface apparente pour un observateur placé au loin, dans la direction du vent, est égale au produit $S \sin\alpha$. L'expérience prouve que la poussée exercée par le

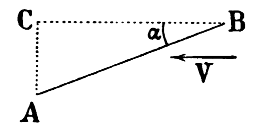


Fig. 24.

vent v sur la surface AB est une force proportionnelle à cette surface AC, c'est-à-dire, la surface S de AB étant donnée, proportionnelle au *sinus de l'angle d'attaque;* c'est la *loi du sinus*. Cette force est d'ailleurs perpendiculaire à AB et peut, par suite, être décomposée en deux forces, l'une verticale et l'autre horizontale ; par analogie avec les expressions consacrées pour les dirigeables, on réserve le nom de *poussée* à la composante verticale et on donne le nom de *traînée* à la composante horizontale. La valeur de la résistance de l'air est alors :

$$k S v^2 \sin \alpha$$

celle de la poussée :

$$k S v^2 \sin \alpha \cos \alpha$$

et celle de la traînée :

$$k\, Sv^2 \sin^2 \alpha.$$

On avait admis pendant longtemps, sur la foi d'un raisonnement attribué à Newton, une loi toute différente, celle du *sinus carré*. L'observation prouvant que les actions de l'air se réduisaient assez exactement à une force normale au plan, on avait cru pouvoir en conclure que seule, la composante de la vitesse normale au plan intervenait. Il y avait là une confusion entièrement gratuite entre la décomposition purement géométrique des vitesses et leurs effets dynamiques. En admettant ce raisonnement, la vitesse normale étant évidemment $v \sin\alpha$, son carré étant $v^2 \sin^2 \alpha$ et par suite la résistance

$$k\, Sv^2 \sin^2 \alpha$$

C'était la loi du sinus carré. Nous allons voir quelles difficultés résultaient de cette loi, difficultés qui disparaissent avec la loi du sinus. C'est Euler qui a le premier énoncé la loi du sinus et Borda qui en a fait les premières vérifications expérimentales, à la fin du XVIII[e] siècle, sous l'inspiration et le contrôle de l'Académie des Sciences de Paris.

La différence capitale entre la loi du sinus carré et la loi du sinus est la suivante :

Avec la loi du sinus carré, l'attaque oblique de l'air par les surfaces portantes (ou ailes) n'est pas plus avantageuse que l'attaque normale (il faut comprendre bien entendu, oblique et nor-

male *par rapport au vent relatif*) ; avec la loi du sinus, au contraire, un calcul simple montre que l'attaque oblique, occasionne une dépense de travail beaucoup moindre que n'exigerait l'attaque normale ; l'explication *quantitative* du vol des oiseaux est ainsi rendue bien plus aisée et la théorie de l'aéroplane est aussi facilitée. Précisons ce point essentiel.

Nous avons dit que la résistance de l'air était une force normale au plan, proportionnelle à la surface de ce plan, au carré de la vitesse, et au sinus de l'angle d'attaque. On a donc[1] :

$$F = k\,Sv^2 \sin i$$

Si l'angle i est petit, la composante verticale de F, ou *poussée*, peut être considérée comme sensiblement égale à F ; comme elle doit équilibrer le poids de l'appareil, on peut écrire, en désignant ce poids par P :

$$P = k\,Sv^2 \sin i$$

La composante horizontale de F, ou *traînée*, est égale ou produit de F' par sin i; elle est donc :

$$k\,Sv^2 \sin^2 i$$

1. Certains auteurs réservent le coefficient k pour la loi de la résistance orthogonale et désignent par φ le coefficient qui s'introduit dans cette formule. Si la formule était valable quel que soit i, ce serait là une simple question de notation, c'est-à-dire qu'on aurait $k = \varphi$; en réalité, il semble bien qu'il n'en soit pas ainsi ; la valeur de φ peut être double de la valeur de k.

On a proposé des formules diverses destinées à représenter le phénomène pour toutes les valeurs de i ; ce qui nous importe seulement, ce sont les *petites valeurs* de i pour lesquelles la formule du texte est certainement exacte, à condition de choisir convenablement le coefficient k.

La vitesse étant horizontale, le travail est égal au produit de cette composante horizontale par le chemin parcouru; le travail par seconde est égal au produit de la traînée par la vitesse[1], c'est-à-dire à

$$k\,Sv^2 \sin^2 i \,.\, v = k\,Sv^3 \sin^2 i$$

Or, sin i est égal à $\frac{P}{k\,Sv^2}$; l'expression du travail peut donc s'écrire :

$$k\,Sv^3 \left(\frac{P}{k\,Sv^2}\right)^2 = \frac{P^2}{kSv}$$

Or, P, k, S, sont des constantes de l'appareil; on arrive donc à ce résultat, en apparence paradoxal, que le travail par seconde est *inversement proportionnel à la vitesse*. Il ne faut pas perdre de vue que la vitesse n'est pas arbitraire; elle est liée au poids de l'appareil par la relation :

$$P = k\,Sv^2 \sin i$$

relation qui montre que la vitesse peut devenir de plus en plus grande, pourvu que i devienne de plus en plus petit. Par conséquent, en diminuant l'angle d'attaque, on peut augmenter la vitesse et diminuer le travail par unité de temps.

1. Il s'agit ici, bien entendu, du travail utile, qui n'est qu'une fraction du travail total dépensé par le moteur ; la fraction de ce travail employée à communiquer une certaine force vive à l'air que brasse l'hélice est négligée en tous cas : pour que le calcul fût absolument correct, il faudrait être certain que ce travail négligé est toujours égal à la même fraction du travail utile.

Avec la loi du sinus carré, il en serait tout autrement : on aurait :

$$P = k\, Sv^2 \sin^2 i$$

et le travail serait :

$$k\, Sv^3 \sin^3 i$$

Si l'on remplace sin i par sa valeur

$$\sqrt{\frac{P}{k\, Sv^2}}$$

l'expression du travail devient :

$$\frac{P\sqrt{P}}{\sqrt{kS}}$$

elle est indépendante de v ; on ne gagne donc rien, au point de vue du travail par seconde, à l'attaque oblique ; le seul bénéfice est l'augmentation possible de la vitesse, augmentation qui serait même plus grande qu'avec la loi du sinus simple. Mais nous n'insistons pas, puisque la loi du sinus carré est inexacte.

Application au vol des oiseaux.

Dans le cas du vol des oiseaux, il faut supposer que l'on se place, pour comparer les deux modes d'attaque de l'air, dans des conditions équivalentes. L'oiseau peut, en effet, abaisser ses ailes plus ou moins rapidement ; un grand nombre de régimes divers sont possibles ; pour nous rendre compte de l'effet de ces variations de régime,

nous allons étudier succinctement, mais avec quelque précision, un appareil orthoptère schématique formé d'un corps A et d'ailes symétriques AB, AC, pouvant prendre les positions AB′, AC′.

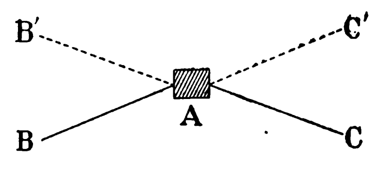


Fig. 25.

Nous désignerons par P le poids total de l'appareil, par S la surface totale des ailes, par *a* leur course moyenne ; au point de vue du travail, si l'aile est rectangulaire, cette vitesse moyenne peut être regardée comme approximativement égale au quotient par $\sqrt[3]{4}$ de la course CC′ ou BB′ des extrémités, c'est-à-dire sensiblement aux cinq huitièmes de cette course des extrémités[1]. Désignons par *n* le nombre de battements

1. Soit en effet ω la vitesse angulaire, l la dimension de l'aile perpendiculaire à A C, x la distance à A d'un élément rectangulaire ldx ; la vitesse de cet élément est ωx et la résistance de l'air $K(\omega x)^2 ldx$; le travail de cette résistance en un temps dt, le chemin parcouru étant $\omega x dt$ est :

$$kl\omega^3 x^3 \, dx dt$$

Si l'on fait varier x de o à h, largeur totale de l'aile, l'intégrale est :

$$kl\omega^3 \frac{h^4}{4} dt$$

Si la vitesse ω est constante, l'intégrale de $\omega h dt$ est égale à la course b de l'extrémité, ce qui donne pour le travail total :

$$kl\omega^2 \frac{h^3}{4} b$$

D'autre part, la vitesse de l'extrémité est ωh, ceci peut donc

complets par exemple, (un battement complet comprend la montée et la descente), et par u le rapport de la durée de la descente de l'aile à la durée de la montée (ce rapport est forcément inférieur à l'unité, comme le montrera le calcul ci-après) ; le temps de la descente de l'aile est ainsi :

$$\frac{u}{n(1+u)}$$

et le temps de la montée :

$$\frac{1}{n(1+u)}$$

Par exemple, si $n = 10$ et $u = 1/2$, le temps de la descente est $1/30$ de seconde et le temps de la montée $1/15$ de seconde.

Le chemin parcouru étant a, la vitesse est à la descente :

$$\frac{an(1+u)}{u}$$

s'écrire :

$$klh \frac{(\omega h)^2}{4} b$$

Si, pendant le même temps, la course était a au lieu de b, la vitesse serait $\frac{\omega h a}{b}$ et le chemin parcouru a; le travail serait donc :

$$klh \left(\frac{\omega h a}{b}\right)^3 a.$$

Les deux expressions coïncident si l'on prend :

$$\left(\frac{a}{b}\right)^3 = \frac{1}{4}$$

c'est-à-dire :

$$a = \frac{b}{\sqrt[3]{4}} .$$

Or $\frac{1}{\sqrt[3]{4}}$ diffère très peu de $5/8$, car

$$\left(\frac{5}{8}\right)^3 = \frac{125}{512} \text{ et } \left(\frac{1}{\sqrt[3]{4}}\right)^3 = \frac{1}{4} = \frac{125}{500} .$$

et à la montée :

$$an\,(1 + u)$$

Si a est évalué en mètres, cette vitesse sera évaluée en mètres par seconde. La poussée à la descente est donc, en désignant par k le coefficient empirique de la résistance de l'air[1] :

$$\frac{ka^2n^2\,(1 + u)^2}{u^2}\,S$$

et, à la montée :

$$ka^2n^2\,(1 + u)^2\,S$$

L'appareil est donc soumis, pendant un temps

$$\frac{u}{n\,(1 + u)}$$

à une force verticale ascendante égale à

$$\frac{ka^2n^2\,(1 + u)^2}{u^2}\,S - P$$

puis, pendant un temps :

$$\frac{1}{n\,(1 + u)}$$

à une force verticale descendante égale à

$$ka^2n^2\,(1 + u)^2\,S + P$$

Pour que l'accélération verticale totale soit nulle, il faut que l'on ait :

$$\frac{u}{n\,(1 + u)}\left[\frac{ka^2n^2\,(1 + u)^2}{u^2}\,S - P\right] =$$

$$= \frac{1}{n\,(1 + u)}\,[ka^2n^2\,(1 + u)^2\,S + P]$$

1. Nous négligeons la vitesse verticale propre de l'appareil par rapport à la vitesse relative de l'aile ; cette approximation est légitime, du moment que cette vitesse relative de l'aile est suffisamment grande.

c'est-à-dire :

$$ka^2n^2 (1 + u)^2 \left(\frac{1}{u} - 1\right) S = P (1 + u)$$

ou enfin

$$(1) \qquad n^2 = \frac{Pu}{ka^2 S (1 - u^2)}$$

On voit que le problème du vol est toujours théoriquement possible, quelles que soient les données P, *a*, S *à condition de prendre n assez grand.* — Mais pratiquement, on ne pourra pas augmenter *n* sans augmenter la force du moteur et par suite P.

Le travail par battement d'aile, en négligeant toujours les mouvements verticaux d'ensemble est

$$ka^2n^2 (1 + u)^2 \left(\frac{1}{u^2} + 1\right) Sa = Pua (1 + u)^2 \left(\frac{1}{u^2} + 1\right);$$

si *u* n'est pas très petit, il est de l'ordre de grandeur du produit P*a* ; mais le travail *par seconde* s'obtient en multipliant par *n* ce travail par battement d'ailes. Il y donc intérêt à rendre *n* le plus faible possible ; mais *n* est déterminé par la formule (1) au moyen des autres données ; on obtient en remplaçant *n* par sa valeur, pour le travail par seconde, une expression de la forme

$$\frac{P\sqrt{P}}{\sqrt{kS}} \varphi (u)$$

dans laquelle nous n'explicitons pas la fonction $\varphi (u)$, dont la valeur numérique ne serait importante que si *u* était ou très voisin de 1 ou très voisin de 0. Il est remarquable que cette expression du travail ne renferme plus *a* ; elle coïncide, au facteur près $\varphi (u)$ avec celle que nous avons obtenue p. 49.

On voit, en résumé, que le travail dépensé ne descend pas au-dessous d'une certaine limite qui

est relativement élevée ; c'est par des calculs de ce genre qu'on était arrivé à des conclusions très exagérées sur la force musculaire des oiseaux et sur la difficulté du vol artificiel.

Imaginons maintenant un oiseau qui se déplace en battant des ailes; si l'oiseau était immobile, ou s'il s'élevait verticalement, le déplacement des ailes, de haut en bas, pourrait être considéré comme sensiblement normal aux filets d'air déplacés par ce battement; c'est le vol orthoptère que nous venons d'étudier. Mais, si l'oiseau a

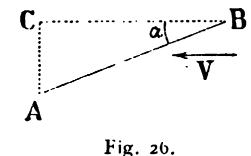


Fig. 26.

une vitesse horizontale, cette vitesse crée un *vent relatif* ; tout se passe, au point de vue de la résistance de l'air, comme si l'aile immobile était frappée par un courant d'air oblique, dont la direction est la résultante du mouvement vertical de l'aile et du mouvement horizontal du vent relatif. Si, en une seconde, l'extrémité de l'aile s'abaisse de C en A, tandis que l'oiseau se déplace de B vers C, tout se passe comme si cette extrémité s'était déplacée de B vers A, suivant le chemin oblique BA ; on voit qu'il en résulte à la fois une augmentation de la vitesse (qui est BA, au lieu de CA) et l'introduction d'un angle d'attaque aigu, et non plus droit. Si l'on désigne par α cet angle aigu, et par v la

vitesse de l'aile par rapport à l'oiseau immobile, c'est-à-dire la distance verticale CA, dont elle s'abaisse pendant l'unité de temps[1], il est clair, que la vitesse relative BA $= v'$, est égale au quotient de v par sin α; la résistance est donc[2] :

$$k\,Sv'^2 \sin\alpha = k\,S\left(\frac{v}{\sin\alpha}\right)^2 \sin\alpha = k\,Sv^2\,\frac{1}{\sin\alpha}$$

On voit que, pour une valeur donnée de v, la résistance augmente lorsque α diminue ; on pourrait donc croire qu'il y a inconvénient à diminuer l'angle d'attaque ; mais ce n'est pas ainsi que la question se pose ; la résistance totale, normale à l'aile, doit équilibrer le poids de l'oiseau (et l'élever verticalement pour compenser la chute qui se produit pendant le relèvement des ailes) ; c'est donc une donnée du problème, et l'on voit qu'en diminuant α, on obtient le même résultat avec une valeur plus faible de v, d'où résulte par un calcul que nous omettons, car son résultat est intuitif, une épargne de travail[3].

Ainsi, l'oiseau peut se soutenir en l'air au moyen de mouvements beaucoup plus lents des ailes, quand il a une vitesse horizontale. Si l'on désigne

1. Pratiquement, le battement de l'aile dure moins d'une seconde ; il faut donc supposer que l'on prend pour unité de temps un dixième ou un centième de seconde.

2. Avec la loi du sinus carré, on aurait eu $k\,S\,v'^2 \sin^2\alpha = k\,S\,v^2$, c'est-à-dire un résultat indépendant de l'angle d'attaque.

3. La valeur de la résistance qui vient d'être calculée peut aussi s'écrire $kSvv'$ et il est clair que l'augmentation de v' permet de diminuer v; le travail par unité de temps est égal au produit de cette résistance par v; il diminue donc avec v.

par V la vitesse de l'aile, et par H la vitesse horizontale, on a :

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{V}{H}$$

et si l'angle α est assez petit pour que le sinus puisse être confondu avec la tangente

$$\frac{V^2}{\sin\alpha} = VH$$

Ce produit VH devant être constant, il en résulte que V est inversement proportionnel à H ; si la vitesse horizontale devient double ou triple, la vitesse de l'aile peut devenir deux ou trois fois plus faible.

Application à l'aéroplane.

Pour l'aéroplane proprement dit, il n'y a rien à ajouter aux raisonnements de la page 140, qui s'y appliquent intégralement ; il résulte de la loi du sinus, que le travail dépensé en vue de la sustentation, diminue quand la vitesse augmente ; il n'en est malheureusement pas de même du travail dépensé pour vaincre les résistances passives ; c'est là une question importante que nous allons maintenant étudier.

L'augmentation de la vitesse des aéroplanes est peut-être la question qui a le plus préoccupé les esprits, dès les premiers essais de 1908. Nous discuterons dans le chapitre suivant l'importance de cette vitesse pour les applica-

tions, ainsi que les avantages et inconvénients des grandes vitesses, au point de vue de la sécurité des aviateurs ; pour l'instant, nous ne considérons la question qu'au point de vue de la résistance de l'air, supposé calme : quelles difficultés oppose cette résistance à l'augmentation indéfinie des vitesses ?

Le bon sens indique, sans qu'il soit nécessaire d'écrire des formules, que pour augmenter la vitesse, il est nécessaire d'augmenter la puissance du moteur ; ceci ne peut être réalisé, dans un état donné de l'industrie des moteurs, qu'en augmentant le poids du moteur, et par suite, le poids total de l'appareil et son encombrement. Cette augmentation des surfaces portantes entraîne une augmentation de la résistance de l'air à leur avancement ; mais, d'autre part, l'augmentation de la vitesse diminue, comme nous l'avons vu, cette résistance à l'avancement pour un appareil donné, par suite de la diminution de l'angle d'attaque ; nous pouvons, à une première approximation, admettre qu'il y a compensation entre ces deux effets opposés ; nous nous épargnons ainsi d'assez longs calculs sans grand intérêt, et l'erreur n'est pas très grande, car la résistance à l'avancement des surfaces portantes n'est, pour les grandes vitesses qui sont seules intéressantes, qu'une fraction assez faible de la résistance totale. On ne peut, en effet, supposer l'aéroplane réduit à ses plans sustentateurs ; il y a en outre, comme nous l'avons vu, une carcasse, des haubans et des entretoises, le siège du pilote et le pilote lui-

même, des leviers, le moteur, des organes de transmission, des réservoirs à huile et à essence, etc.

Tous ces organes ne jouent pas de rôle dans la sustentation, et introduisent un coefficient très important dans la résistance à l'avancement.

Les expériences précises qui permettraient de chiffrer exactement la valeur absolue de cette résistance, font malheureusement défaut; elles sont d'ailleurs assez délicates à réaliser[1]; mais on peut cependant se faire une idée de l'ordre de grandeur du phénomène par ce que l'on sait de la résistance opposée par l'air, au déplacement d'une locomotive ou d'une automobile. Cette résistance est très considérable et, pour les plus grandes vitesses actuellement atteintes (120 kilomètres à l'heure environ), elle absorbe la presque totalité de la puissance dépensée. Si donc, on fait abstraction des conditions de sécu-

1. La méthode la plus simple semble consister à étudier l'aéroplane lui-même en plein vol ; mais la difficulté est alors la suivante : indépendamment de problèmes accessoires mais non cependant négligeables, on a deux inconnues principales : le travail de l'hélice et la portion de ce travail employée à vaincre les résistances passives et l'on n'obtient par l'expérience qu'une relation entre ces deux inconnues. L'étude du travail de l'hélice au point fixe ne donne en effet que des renseignements grossièrement inexacts sur son travail en marche. On a bien proposé d'admettre que le rapport de ces deux travaux est égal au recul relatif, mais ce résultat n'est nullement démontré. Il est donc nécessaire de recourir à un appareil mobile (automobile ou train sur rails) ayant une vitesse comparable à celle de l'aéroplane, pour déterminer l'une des inconnues : on peut, ou y adapter l'hélice et mesurer ainsi son travail en marche, ou lui faire transporter la carcasse de l'aéroplane et mesurer ainsi le travail supplémentaire nécessité par la résistance de l'air à son déplacement.

rité et de rendement[1] dont nous parlerons au chapitre suivant, on peut dire que le problème de la vitesse se pose à peu près exactement de la même manière pour les divers appareils destinés essentiellement à *faire de la vitesse*, c'est-à-dire dans lesquels la charge utile est réduite au minimum. Qu'il s'agisse, en effet, d'une automobile ou d'un aéroplane, c'est le moteur et ses accessoires (notamment les réservoirs) qui constituent l'encombrement principal, au déplacement duquel s'oppose l'air. Et le problème se pose ainsi : avoir un moteur d'une puissance suffisante pour vaincre la résistance opposée par l'air au déplacement rapide de ce moteur même, de ses accessoires et du cadre rigide qui assemble ces divers organes. Sans doute, le problème est ainsi un peu trop simplifié, et il sera indispensable, si on le résout sous cette forme, de prévoir un certain jeu pour ne pas être pris de court ; d'avoir, par exemple, une puissance supérieure d'environ 50 p. 100 à la puissance calculée ; mais la simplification introduite met nettement en évidence la nature des difficultés mécaniques à vaincre pour l'obtention de très grandes vitesses. Grâce à la diminution possible de l'angle d'attaque ou de l'étendue des surfaces portantes[2], la résistance

1. Le rendement est le rapport entre la puissance utilisée et la puissance totale du moteur ; il est inférieur à l'unité par suite des frottements des organes de propulsion (usure des roues et de la route dans le cas de l'automobile, mouvements tourbillonnaires de l'eau et de l'air dans le cas des hélices, échauffement dans tous les cas).

2. Il n'est pas possible, pour des raisons de stabilité, de diminuer

opposée au déplacement de ces surfaces devient, aux très grandes vitesses, peu importante par rapport à la résistance opposée au déplacement du moteur et de ses accessoires. Cherchons à quelles conséquences on est ainsi conduit.

Admettons que la puissance d'un moteur[1] soit sensiblement proportionnelle à son poids, et admettons que l'on ait pu déplacer un moteur de 100 chevaux avec une vitesse de 100 kilomètres à l'heure. Si l'on a un moteur de 800 chevaux, exactement homothétique au précédent et donnant le même nombre de coups de piston par seconde[2], son volume sera 8 fois plus grand, c'est-à-dire que ses dimensions linéaires seront 2 fois plus grandes, et sa surface 4 fois plus grande ; le travail dépensé pour une même vitesse sera donc quadruple ; comme nous disposons d'une puissance 8 fois plus grande, nous pourrons augmenter la vitesse. Dans quelle proportion ? Nous savons que la résistance est proportionnelle au carré de la vitesse ; le travail est égal au produit de la force par le chemin parcouru ; le travail par unité de temps ou puissance est donc proportion-

indéfiniment l'angle d'attaque ; d'autre part, des raisons de sécurité semblent exiger, qu'au départ ou à l'atterrissage, l'on ne dépasse guère la vitesse de 60 à 80 kilomètres à l'heure ; si donc on veut avoir des vitesses beaucoup plus grandes, il sera nécessaire de pouvoir diminuer pendant la marche l'étendue de la voilure, comme le font les oiseaux : c'est là une conséquence immédiate de la manière dont cette surface S figure dans les formules.

1. A partir de maintenant, nous dirons simplement : *moteur* pour « moteur avec ses accessoires et le bâti ».

2. Voir, dans la note II, le paragraphe sur l'homothétie en mécanique.

nel au cube de la vitesse ; la puissance par unité de surface ayant doublé, nous pourrons donc simplement multiplier la vitesse par la racine cubique de 2, c'est-à-dire obtenir 126 kilomètres au lieu de 100. Pour obtenir 200 kilomètres au lieu de 100, il faudrait multiplier par 8 la puissance par unité de surface et par le cube de 8 ou 512 la puissance, c'est-à-dire avoir environ 50.000 chevaux au lieu de 100, c'est dire que l'on ne peut pas gagner sensiblement par l'augmentation des dimensions de l'appareil, du moins à partir du moment où ces dimensions sont suffisantes pour que le poids du pilote et des accessoires divers soit une fraction assez faible de l'organe essentiel.

On peut se demander s'il n'est pas possible d'augmenter la puissance du moteur autrement que nous venons de le dire. On peut, par exemple, concevoir que l'on place un grand nombre de cylindres sur une même ligne, dont la direction serait celle de la marche normale ; la surface présentée normalement au vent debout serait alors la même, quel que soit le nombre de ces cylindres. De tels dispositifs modifieraient les résultats numériques qui précèdent, mais ne changeraient pas nos conclusions générales, que l'on peut résumer ainsi : ce n'est pas en augmentant beaucoup la puissance et les dimensions du moteur que l'on arrivera aux grandes vitesses ; on ne gagnera presque plus rien à partir de quelques centaines de kilogrammes, à moins de modifications actuellement imprévisibles dans l'industrie des moteurs. Ce que l'on doit tendre à obte-

nir, c'est évidemment la diminution du poids du moteur de puissance donnée, mais surtout la diminution de l'encombrement et de la résistance à l'avancement ; pour les très grandes vitesses, c'est un élément plus important que le poids. Enfermer le moteur dans une carène à profil soigneusement calculé pour diminuer les résistances, modifier de même tous les obstacles autres que les surfaces portantes (entretoises, siège du pilote, etc.) telle est la tâche la plus immédiate qui s'impose aux constructeurs. On ne perdra pas de vue, dans l'étude expérimentale des problèmes ainsi posés, que les profils arrière sont peut-être encore plus importants que les profils avant pour la diminution de la résistance de l'air. On devra aussi, dès que l'on abordera les grandes vitesses (au-dessus de 100 ou 120 kilomètres à l'heure) se bien pénétrer de l'idée que le *poids* est un inconvénient moins grand que l'*encombrement* et que par suite les matériaux ultra-légers ne sont pas les meilleurs ; ce n'est pas la matière la plus solide à poids égal qu'il faudra préférer, mais la plus solide à *surface nuisible* égale.



CHAPITRE VII

L'AVENIR DE L'AÉROPLANE

Ce n'est qu'avec beaucoup de prudence et de précautions oratoires qu'il peut être permis de parler de l'avenir d'une invention mécanique ; encore ne peut-il s'agir que de l'avenir immédiat, jusqu'au moment possible où une idée entièrement neuve bouleversera complètement les conditions du problème ; les considérations sur l'avenir de l'antique bicycle ont perdu toute valeur le jour de l'invention de la bicyclette.

Sous ces réserves nécessaires, il n'est peut-être pas inutile de se demander ce que sera l'aéroplane de demain et à quoi il pourra servir, sans escompter de découverte nouvelle, en tenant compte seulement des perfectionnements de détail que l'on peut légitimement attendre des progrès continuels des arts mécaniques.

Les desiderata actuels.

La stabilité et la gouverne. — L'un des plus importants progrès à réaliser est la stabilité de marche ; l'aéroplane ne doit pas chavirer sous

l'action des remous aériens ni sous l'action de la manœuvre des gouvernails. Cette stabilité de marche dépend pour une grande part de l'habileté personnelle du pilote et l'on sait que certains aviateurs, tels que Latham [1] et Paulhan ont déjà acquis une maîtrise admirable ; on doit supposer que la diffusion du sport de l'aviation suscitera rapidement de nombreux pilotes dont certains acquerront une habileté exceptionnelle ; ceux-là dresseront des élèves, formuleront des préceptes et l'éducation des aviateurs deviendra à la fois plus aisée et plus complète. Mais, quelque légitimes que soient ces espoirs de voir croître l'habileté personnelle des pilotes, on ne saurait s'en contenter. Le but de la science est précisément de créer des moyens mécaniques qui diminuent l'importance des différences individuelles. Sans doute, on doit souhaiter que ce but ne soit jamais entièrement atteint, car le perfectionnement individuel de l'homme doit rester le but le plus noble de la vie : mais le progrès ne supprime pas la nécessité de ce perfectionnement individuel ; il se contente de modifier les domaines où il s'exerce. Le jour où la gouverne des aéroplanes serait rendue aussi aisée que celle d'une bicyclette, la race des Wright et des Blériot ne s'éteindrait pas pour cela ; d'autres occasions se trouveront pour eux de déployer leur courage dans un but utile à l'humanité.

1. On doit citer aussi Santos Dumont, dont l'habileté personnelle paraît jouer un rôle prépondérant dans les résultats obtenus avec des appareils qui seraient sans doute fort dangereux avec tout autre pilote.

Il serait donc désirable que la stabilité de l'aéroplane soit rendue automatique et en même temps la gouverne aisée. Nous avons déjà fait observer que ces deux conditions sont partiellement contradictoires ; un appareil construit de telle manière qu'une force très grande serait nécessaire pour le faire chavirer sera très stable ; mais il sera aussi très indocile au gouvernail, soit qu'il s'agisse d'exécuter un mouvement désiré (virage, ascension, descente), soit qu'il s'agisse de reprendre la position normale dont il aurait été momentanément écarté par un accident. Ce serait là une raison suffisante pour écarter les procédés de stabilisation automatique où interviennent, soit des masses considérables (gyroscopiques ou pendulaires [1]), soit des surfaces d'empennage importantes. La stabilisation doit être obtenue par des moyens mécaniques qui ne puissent jamais être une gêne pour le pilote ; il faut donc qu'il n'entre pas en jeu de masses importantes, mais seulement une masse relativement faible dont l'action se trouve multipliée par un mécanisme de transmission. En d'autres termes, la masse stabilisatrice n'agit pas par elle-même, mais sert seulement à déclancher le mécanisme stabilisateur [2]. De tels procédés sont déjà utilisés, notamment dans les torpilles automobiles ; leur application effective à l'aéroplane

1. On sait que le gyroscope a été préconisé pour stabiliser des trains se déplaçant sur un monorail. Des essais assez sérieux ont été tentés dans cette direction, sans avoir cependant encore abouti à la réalisation industrielle.

2. Voir la note I, p. 233.

n'a pas encore été pratiquement réalisée ; mais ce n'est là qu'une question de patience et de temps. On a le choix entre les procédés pendulaires et les procédés gyroscopiques ; disons un mot du principe de ces derniers[1]. On sait qu'un gyroscope n'est pas autre chose qu'une sorte de toupie animée d'un mouvement de rotation très rapide. Si l'on cherche à déplacer son axe, il résiste en quelque sorte au déplacement ; la force de réaction croît avec la vitesse de rotation ; sa direction est perpendiculaire à l'axe et perpendiculaire aussi au déplacement que l'on tend à lui imprimer. Concevons un gyroscope placé dans un véhicule quelconque (train, automobile, bateau, aéroplane) ; les variations de direction du véhicule seront ressenties par le gyroscope avec une très grande sensibilité et une très grande précision ; on conçoit donc, sans qu'il soit nécessaire d'entrer dans le détail, que ce gyroscope puisse actionner un mécanisme ayant pour but de rectifier à chaque instant les variations de route ; l'appareil suivra ainsi un chemin à peu près rigoureusement rectiligne, de la même manière qu'un cycliste sur une route droite ; il se produit sans cesse de très légères sinuosités autour de cette direction, mais chaque tendance à la déviation est immédiatement corrigée par une manœuvre qui produit une déviation opposée, qui est corrigée elle-même par une nouvelle manœuvre,

1. Le principe des procédés pendulaires est au fond analogue : ils sont basés aussi sur le fait que l'inertie d'une masse en mouvement permet de discerner certains mouvements relatifs (pendule de Foucault).

et ainsi de suite. Seulement, c'est le gyroscope qui agirait, et non la volonté toujours en éveil du pilote, comme dans le cas de la bicyclette. On pourrait même concevoir cette gouverne gyroscopique réalisée d'une manière tellement parfaite que tout virage deviendrait impossible, ainsi que tout changement d'inclinaison de la trajectoire vers le haut ou vers le bas ; il suffirait alors de prévoir une sorte de désembrayage, qui supprimerait l'action du gyroscope sur le mécanisme stabilisateur. Pour modifier sa direction, le pilote effectuerait d'abord ce désembrayage, et gouvernerait alors son appareil comme il le fait actuellement ; c'est seulement en reprenant la route droite qu'il confierait de nouveau au gyroscope le soin de maintenir la direction nouvelle. Une telle disposition ne supprimerait pas la nécessité pour l'aviateur d'être habile ; son éducation devrait toujours avoir été faite sur des appareils à gouverne libre, car dans les circonstances difficiles et imprévues, c'est à cette gouverne libre qu'il aurait recours ; mais elle le libèrerait de la nécessité d'une attention constante et soutenue ; pendant d'assez longs intervalles de temps, le pilote aurait tout loisir pour regarder autour de lui, consulter une carte, vérifier son moteur s'il n'a point de mécanicien, observer la boussole, le baromètre, l'inclinaison de l'appareil sur l'horizon, etc. Il semble que ce progrès appréciable ne doive pas être regardé comme actuellement irréalisable.

Il n'en est peut-être pas de même pour une conception très ingénieuse, soumise au calcul par

M. Brillouin[1], mais qui paraît actuellement assez loin de la réalisation expérimentale : il n'est pas logiquement impossible de concevoir un aéroplane qui serait stable dans toutes les positions, c'est-à-dire avec lequel il suffirait de voler à une assez grande hauteur pour être certain de ne pas perdre son équilibre, même si un fort coup de vent chavirait complètement l'appareil.

Même en laissant de côté les difficultés relatives à la suspension de la nacelle (ou siège du pilote), il semble bien que la question soit encore loin d'être au point ; il nous a paru cependant nécessaire de la signaler ; car, même si la conception d'un tel aéroplane devait rester toujours un idéal théorique, cet idéal peut servir de guide pour la réalisation d'appareils pouvant supporter, sinon un chavirement total, du moins des embardées assez fortes qui seraient fatales aux appareils actuels.

LA VITESSE ET LA DURÉE. — Nous avons déjà parlé des difficultés d'une augmentation de la vitesse et avons vu que ce n'est pas par l'augmentation de la dimension des appareils que l'on peut espérer gagner beaucoup. On a donc le choix entre deux procédés : le perfectionnement du moteur et la diminution de la résistance de l'air par une meilleure disposition des diverses parties de l'appareil. Il n'est guère possible de donner sur ces deux points des indications bien précises ; il n'était cependant pas inutile de les

1. *Revue de Mécanique*, 1909.

signaler en quelque sorte sur le même plan, car on paraît généralement accorder beaucoup plus d'importance au perfectionnement du moteur qu'à l'architecture de l'aéroplane ; il n'est pas douteux en effet qu'une découverte nouvelle, peut effectivement apporter aux moteurs de même poids et de même encombrement une puissance beaucoup plus grande et réaliser ainsi d'un seul coup un très grand progrès. Mais une telle découverte est forcément imprévisible et, d'autre part, si l'on s'en tient à ce qui peut être prévu, les perfectionnements immédiats de l'architecture seront sans doute d'une plus grande importance que les perfectionnements immédiats du moteur.

Les grandes altitudes récemment atteintes par les aéroplanes[1] ont certainement conduit bien des gens à se poser la question suivante : ne peut-on pas augmenter notablement la vitesse en se laissant ainsi glisser d'une grande hauteur ? S'il s'agit de battre un record de nature particulière, c'est-à-dire de réaliser pendant un petit nombre de minutes la plus grande vitesse, le moyen peut en effet être bon. Mais s'il s'agit d'effectuer un long voyage, pendant lequel il sera nécessaire de remonter à plusieurs reprises à l'altitude dont on sera descendu, ce petit jeu de montagnes russes ne sera jamais bien avantageux, s'il n'est pas nuisible. Il est inutile, pour

1 On sait que Paulhan a volé, en Amérique, à 1.500 mètres au-dessus du sol. D'autre part, le même Paulhan a volé à plus de 4.000 mètres au-dessus du niveau de la mer ; nous disons plus loin quelques mots de l'influence de l'altitude sur la vitesse de l'aéroplane.

s'en rendre compte, de faire un calcul détaillé qui exigerait d'ailleurs la connaissance de données numériques précises sur un appareil déterminé, son moteur, la résistance de l'air aux diverses allures suivant l'inclinaison de la voilure, etc. ; il suffit de songer aux analogies mécaniques nombreuses et bien connues d'après lesquelles le régime régulier est toujours préférable au régime irrégulier ou périodique. Cette conclusion pourrait être modifiée si l'on arrivait à utiliser certains mouvements réguliers ou périodiques de l'atmosphère, mais ceci rentre dans la catégorie des rêves d'avenir, légitimes en tant que rêves, mais dont on ne saurait tenir compte tant qu'ils n'ont pas reçu un commencement de réalisation.

La durée des voyages aériens est un élément non moins important que la vitesse, surtout tant que la vitesse ne dépassera pas les vitesses actuellement réalisées par d'autres moyens de transport [1]. La prolongation de la durée sans escales est liée à la régularité de la marche du moteur, à sa consommation, à la possibilité d'enlever un mécanicien en même temps que le pilote. On peut espérer gagner un peu par des progrès de détail ; il faudrait, pour gagner beaucoup, une invention aussi nouvelle que l'a été celle du moteur à explosion. Nous entrons de nouveau dans le domaine de l'imprévisible. Nous avons déjà observé que l'encombrement (ou volume) du moteur et de ses accessoires est un élément presque aussi important que le poids ; on peut

1. Voir p. 170, ce que nous disons de l'utilisation pratique.

prévoir l'utilité, pour de longs voyages sans escales, d'un dispositif qui permettrait, en diminuant l'encombrement des réservoirs d'huile et d'essence au fur et à mesure de la consommation de réaliser des vitesses plus grandes à la fin du voyage et par suite un parcours total plus considérable ; cet avantage serait d'ailleurs assez minime si l'on supposait réalisées les modifications d'architecture dont nous parlions tout à l'heure.

LA SÉCURITÉ. — On a fort heureusement, grâce à la prudence et au courage des premiers aviateurs, franchi depuis longtemps le stade où l'avenir de l'aviation aurait pu être compromis par des accidents témoignant d'une trop grande insécurité ; ce n'est point une raison cependant pour ne pas attribuer, indépendamment même des sentiments qu'inspire le sort tragique des martyrs de l'aviation, une importance des plus grandes à la sécurité des voyages aériens, au seul point de vue de l'avenir industriel et pratique de l'aéroplane. Le terrible accident de Delagrange (4 janvier 1910) a montré que l'augmentation, même relativement faible, de la vitesse, pouvait devenir rapidement dangereuse ; on s'en rend compte immédiatement si l'on réfléchit que la résistance de l'air étant proportionnelle au carré de la vitesse, le travail résistant par unité de temps est proportionnel au cube de cette vitesse et est par suite, pour une vitesse de 90 kilomètres plus que le double de ce qu'il est pour une vitesse de 70 kilomètres ; il semble que, suivant la nature

des accidents que peut occasionner une trop forte vitesse, le rôle essentiel soit joué, soit par la résistance même, soit par le travail résistant ; nous venons de dire que ce dernier fait plus que doubler quand on passe de 70 à 90 kilomètres ; la résistance fait plus que doubler quand on passe de 70 à 100 kilomètres ; dans les deux cas, un accroissement relatif assez faible entraîne la nécessité de doubler la solidité de l'appareil. Ces difficultés ne paraissent cependant pas insurmontables, surtout si l'on tient compte de l'observation déjà faite, que le poids du squelette de l'aéroplane importe peut-être moins que sa surface, surtout aux grandes vitesses. Mais elles montrent quelles précautions doivent être prises quand on se propose d'augmenter les vitesses actuellement réalisées.

Les autres procédés suggérés pour augmenter la sécurité paraissent encore assez éloignés de la réalisation pratique. Pour les vols à très grande hauteur, on pourrait songer à emporter un parachute ; cette précaution pourrait même s'imposer dans le cas d'un hélicoptère pur, sans surfaces portantes auxiliaires ; dans le cas de l'aéroplane, il ne semble pas qu'elle soit actuellement désirable, et il est même probable qu'elle ne le deviendra pas. L'aéroplane est à lui-même son propre parachute et d'habiles pilotes ont pu descendre, moteur arrêté, de plus de 100 mètres de hauteur.

On a songé aussi, pour les voyages au-dessus de la mer, à la possibilité de sortes de flotteurs maintenant l'appareil à la surface de l'eau et

permettant d'attendre du secours ou même de repartir après avoir réparé l'accident auquel était due la panne. Mais aucune expérience n'a encore été tentée dans cet ordre d'idées. Dans sa traversée de la Manche, Blériot s'était contenté d'emporter un petit canot en toile caoutchoutée qui lui aurait sans doute permis, s'il était tombé à la mer, d'attendre quelques heures un secours efficace.

Nous avons laissé de côté jusqu'ici la distinction entre monoplans et biplans ; il ne sera pas inutile de les comparer, avant de parler de l'utilisation pratique de l'aéroplane.

Monoplans et biplans.

L'histoire même du développement de l'aviation a semblé marquer entre monoplans et biplans une différence essentielle. Aujourd'hui encore, après les expériences les plus récentes, c'est une opinion assez générale que le biplan est en soi plus stable que le monoplan ; mais que le monoplan utilise mieux la force motrice parce qu'il présente moins de résistances parasites.

Il n'est pas inutile de montrer que cette opinion est mal fondée et que les raisons simplistes par lesquelles on prétend la justifier sont sans valeur.

Admettons avec la plupart des constructeurs (c'est là une hypothèse essentielle qui sera discutée plus loin), que l'écart des deux plans sustentateurs du biplan est suffisant pour que l'action de l'air sur chacun d'eux ne soit pas influencée par l'autre. Faisons la même hypothèse sur

l'écart des cloisons verticales s'il en existe. Dans ces conditions, aucune différence n'existe entre la théorie rigoureuse du monoplan et celle du biplan : les mêmes équations régissent, par exemple, les mouvements du biplan à longue queue cellulaire et du monoplan à longue queue horizontale et à quille verticale. Les grandeurs dont dépendent leur stabilité, leur vitesse, etc., peuvent être rendues égales dans les deux cas. Comme l'a toujours affirmé Wilbur Wright, ce sont les questions d'encombrement et de commodité de construction qui doivent déterminer le choix de l'aviateur entre la forme biplan et la la forme monoplan.

Pourtant bien des théoriciens ont affirmé la supériorité du biplan quant à la stabilité et celle du monoplan quant à la vitesse. Discutons leurs raisons.

STABILITÉ. — Parlons d'abord de la stabilité. Comparons un monoplan et un biplan qui aient même surface portante totale, le rapport de l'envergure des ailes à leur largeur étant le même dans les deux appareils. Supposons que l'appareil pique légèrement du nez, d'un angle de 1° par exemple : le centre des pressions sur les ailes va s'avancer un peu et son déplacement sera plus grand (dans la proportion d'environ 1,4) pour le monoplan que pour le biplan. Cela est indiscutable. Mais faut-il en conclure, comme on le fait généralement, que ce soit là pour le monoplan une cause d'instabilité ? En aucune façon. C'est au contraire le déplacement du centre de

pression qui tend à redresser le nez de l'appareil, qui crée ce que les mécaniciens appellent un couple de rappel. Plus ce déplacement est prononcé, plus le rappel à l'ordre est énergique. Cela est si vrai que, dans le cas du biplan Voisin la queue est plus effacée que les ailes, cela pour accroître le déplacement du centre de pression et le rendre aussi marqué que dans le cas du monoplan [1].

Toutefois un déplacement *exagéré* du centre de pression a un double inconvénient : d'une part l'appareil devient résistant à la gouverne : d'autre part il épouse trop fidèlement les fluctuations de l'air et l'hélice pousse mal. Mais rien de plus aisé que de combattre ce défaut s'il existe, soit par la forme du fuselage, soit par la position du centre de gravité, soit par une inclinaison plus accentuée de la queue. En un mot, que l'appareil soit monoplan ou biplan, on peut lui donner la stabilité qu'on veut.

VITESSE. — Passons à la question vitesse. De nos deux aéroplanes supposés du même poids et munis du même moteur quel est celui qui ira le plus vite ? C'est le monoplan, dit-on, car il n'offre pas à la résistance de l'air ces multiples entretoises qui retardent le biplan. Mais, d'autre part, pour être rigides, les ailes (plus larges) du mono-

1. Remarquons qu'on lit presque partout qu'un des effets utiles de la queue est d'atténuer le déplacement en question. Cela ne serait vrai que si la queue était beaucoup moins large, de l'avant à l'arrière, que les ailes, ou plus inclinées que celles-ci. Pour le biplan Voisin notamment, cette influence de la queue est donc précisément inverse de celle qu'on s'imagine.

plan devront être plus épaisses, d'où un accroissement des résistances et du poids *non utile*.

Dira-t-on qu'on diminuera les ailes du monoplan ? Mais plus on diminuera sa voilure, plus celle-ci devra se cabrer pour soutenir l'appareil, et l'accroissement des résistances à l'avancement de la voilure pourra compenser, et au delà, ce qu'on aura gagné d'autre part.

Répétons-le : Pour décider entre monoplan et biplan, les raisons d'encombrement et de commodité de construction interviennent seules. Une très grande surface portante est difficile à réaliser solidement sur un seul plan. Au contraire, des appareils à faible voilure, qui portent beaucoup par mètre carré, seront plus commodes à construire en monoplans : car la voilure ayant une inclinaison notable, le plan inférieur du biplan masquerait en partie le plan supérieur si leur écart n'était pas très grand.

Il est intéressant de remarquer que les appareils *à très grande vitesse* seront des appareils ayant pour leur poids une grande surface portante : contrairement à l'opinion commune, la forme biplan leur conviendra mieux que la forme monoplan.

INFLUENCE DES DEUX PLANS DU BIPLAN L'UN SUR L'AUTRE. — Toute la discussion précédente repose toutefois sur une hypothèse : c'est que l'action de l'air sur chacun des plans est la même que si l'autre n'existait pas. Cette hypothèse est-elle vraie, ou du moins à peu près vraie, sans un écart considérable des deux plans? La plupart

des constructeurs l'affirment et pensent, d'après les expériences au ventilateur, assez contestables d'ailleurs, avoir déterminé un écart exactement suffisant. Mais Chanute est d'une opinion assez différente : il pense que les filets d'air emprisonnés entre les deux plans s'opposent, surtout dans le cas du biplan cloisonné, à toute rupture d'équilibre, telle une lance de pompier traversée par un jet d'eau puissant ne se laisse pas dévier sans un vigoureux effort.

Si l'air était canalisé par le biplan sur une longueur, non pas de 2 mètres, mais de 30 ou 40 mètres, l'idée de Chanute serait facile à justifier rigoureusement. Mais, étant données les dimensions vraies, ce n'est là qu'une opinion qui ne repose sur aucune preuve solide. On cite à son appui la remarquable stabilité automatique des cerfs-volants en forme de boîtes à cigare ; mais le rapport entre le poids et la surface portante est trop différent dans le cas de ces légers appareils et dans le cas d'un aéroplane pour qu'on puisse arguer de l'un à l'autre. On peut remarquer aussi qu'on n'a pas volé encore sur un monoplan comparable à un biplan Wright, c'est-à-dire *entièrement dénué de queue et de quilles et ayant son gouvernail horizontal à l'avant*. Un tel monoplan bien proportionné serait-il aussi facile à manœuvrer (ni plus ni moins) qu'un biplan Wright ? C'est là une question à laquelle l'expérience seule apportera une réponse indiscutable. Mais dès maintenant, après les expériences de Bétheny où le monoplan Latham par exemple s'est montré aussi stable que le biplan Voisin, il

est très vraisemblable que la réponse sera affirmative[1].

POURQUOI LE BIPLAN A VOLÉ LE PREMIER. — Une dernière objection se présente toutefois contre les idées que nous venons de développer. Si la différence entre monoplans et biplans est à ce point secondaire, comment la mise au point du monoplan a-t-elle été beaucoup plus longue que celle du biplan?

Voici pourquoi.

L'école d'aviation qui devait aboutir la première, c'était la plus prudente, celle qui sériait les difficultés, l'école de Lilienthal ou des glissades aériennes. Mais, pour pratiquer efficacement ces glissades, il fallait employer un appareil capable de se soutenir par un vent qui ne fut pas excessif : d'où la nécessité d'une vaste surface portante, plus facile à réaliser comme nous l'avons vu en deux plans qu'en un seul. Les adeptes de Lilienthal étaient donc naturellement conduits à adopter le biplan. Si le biplan a été mis au point le premier, ce n'est donc point parce qu'il est, en soi, plus facile à régler que le monoplan ; c'est parce qu'il s'imposait, comme commodité de construction, à l'école d'Aviation qui était destinée à triompher avant les autres.

1. A l'inverse de Chanute, d'autres aviateurs pensaient que le biplan cloisonné prêtait une prise dangereuse aux remous de l'air. Mais les vols de Paulhan à Bétheny et à Juvisy ont montré qu'il n'en était rien. En un mot, toutes les expériences prouvent l'égale stabilité des types correspondants de biplans et de monoplans.

L'utilisation pratique.

LE SPORT. — L'aviation a commencé par être un sport; elle est encore dans cette période sportive. Il n'y a pas lieu d'insister ici sur les avantages que peuvent retirer de ce sport ceux qui le pratiquent dans le but de gagner des sommes importantes, ni sur les dangers auxquels ils s'exposent, ni sur l'intérêt que le public peut prendre à ces exhibitions. Observons simplement que l'importance de ce côté sportif comme élément de progrès ne saurait être regardée comme négligeable. Pendant plusieurs années encore, les meetings d'aviation contribueront pour une part, sinon exclusive, du moins très importante à l'alimentation en capitaux indispensable à l'industrie nouvelle. En même temps, les conditions imposées pour certains prix suscitent des perfectionnements mécaniques et exaltent le courage des concurrents.

Le sport est donc un *moyen* nullement méprisable : il ne devrait pas être considéré comme une *fin* en soi : ce serait singulièrement rabaisser les martyrs de l'aviation que de les assimiler à un jockey ou à un torero victimes de la passion sportive des foules. Si le sport d'aviation est particulièrement noble, c'est qu'il ne contribue pas seulement à donner une sensation complexe d'élégance et de danger ; il vise plus haut, et l'on ne peut prévoir l'importance que pourra avoir son essor sur l'avenir de l'humanité.

LES VOYAGES. — Dans quelles conditions le

voyage en aéroplane pourra-t-il être autre chose qu'un sport? Plus précisément, dans quelles conditions ce moyen de transport pourra-t-il être préféré à tout autre par une clientèle, même restreinte? Il convient d'examiner successivement les régions civilisées, les régions partiellement ou totalement désertiques, les voyages au-dessus de la mer.

Dans un pays civilisé, abondamment pourvu de routes et de voies ferrées, il semble que l'aéroplane ne deviendra pratique que si sa vitesse augmente dans des proportions notables, arrive à dépasser au moins 120 kilomètres à l'heure, ce qui réduirait d'une manière sensible le trajet Paris Marseille, et d'une manière assez importante le trajet Paris Nice. Nous avons dit plus haut à quelles difficultés se heurte cette augmentation de la vitesse; ces difficultés seront peut-être résolues demain; mais, tant qu'elles subsistent, on ne pensera guère à abandonner le chemin de fer ou l'automobile quand on aura comme unique but de se rendre d'un point à un autre.

La question change d'aspect si l'on considère les régions qui, sans être totalement désertiques, ne sont cependant pourvues que de moyens de communication insuffisants. Il est des régions de la France où un trajet à vol d'oiseau d'une centaine de kilomètres exige sept à huit heures pour celui qui ne dispose pas d'une automobile. Il suffirait donc que l'aéroplane devint plus économique pour qu'il puisse, dans certaines conditions, faire une sérieuse concurrence à l'automobile. Cette question d'économie n'a guère été

étudiée jusqu'ici ; il fallait aller au plus pressé ; c'est l'une de celles pour lesquelles il y a le moins de témérité à escompter l'avenir ; elle est liée, en effet, à des perfectionnements de détail qui sont au nombre des exigences les plus aisément réalisées par les industriels ; il n'y a aucune raison intrinsèque pour que l'aéroplane soit un moyen de transport plus onéreux que l'automobile ; il peut même l'être moins, n'étant pas soumis à la nécessité des bandages de caoutchouc et aux trépidations qui usent rapidement les organes les plus délicats.

L'avantage de l'aéroplane devient plus évident lorsqu'on considère des régions où l'absence de bonnes routes ou de routes directes rend l'automobile aussi lent que le train. Même dans l'Europe occidentale, il ne serait pas malaisé de trouver ainsi des points entre lesquels la vitesse maximum actuellement réalisée, si on l'évalue sur la distance à vol d'oiseau, ne dépasse pas 30 ou 40 kilomètres à l'heure. L'aéroplane donne dès à présent mieux. Une difficulté nouvelle doit être signalée quand il s'agit de franchir des chaînes de montagnes ; la densité de l'air diminue, comme l'on sait, avec l'altitude ; cette diminution influe de manières diverses sur l'aéroplane. Tout d'abord, l'oxygène de l'air est utilisé comme comburant dans le moteur ; sa raréfaction tend à entraîner une diminution de la puissance du moteur ; une difficulté analogue se présente si l'air est employé pour refroidir le moteur. Il sera donc nécessaire de prévoir un dispositif spécial pour *nourrir* le moteur en oxygène ; si ce dispositif

n'est pas trop lourd, la raréfaction de l'air sera sans grande influence. L'air sert aussi de point d'appui à l'hélice; s'il se raréfie, le nombre de tours à puissance égale pourra devenir plus grand et la force propulsive rester à peu près constante. Il y a un effet un rapport constant entre le couple moteur de l'hélice et sa poussée horizontale sur l'appareil. Pour les plans sustentateurs, on devra toujours s'arranger pour que la composante verticale de la résistance de l'air équilibre le poids de l'appareil; il serait donc nécessaire, à vitesse égale, d'augmenter l'angle d'attaque, ce qui augmente la composante horizontale (ou traînée), et qui pourrait avoir pour effet de diminuer la vitesse pouvant être atteinte avec un appareil donné. Mais on peût aussi concevoir qu'on augmente la vitesse, de manière à conserver le même angle d'attaque, et par suite la même poussée et la même traînée; on voit aisément que la vitesse doit être choisie inversement proportionnelle à la racine carrée de la densité de l'air; dans ces conditions, la résistance opposée par l'air au corps de l'appareil resterait aussi la même; nous avons déjà observé que l'importance relative de ces résistances passives croît avec la vitesse; à de grandes vitesses, et avec un moteur bien nourri, la raréfaction de l'air serait ainsi très avantageuse; la vitesse serait multipliée par $\sqrt{2}$ à 5.500 mètres d'altitude, c'est-à-dire passerait de 70 kilomètres à 100 kilomètres. Avec les appareils actuels, il semble bien que l'augmentation d'altitude ne soit pas aussi favorable, mais elle est loin d'être défavorable, comme on l'a parfois écrit, en ne tenant

pas compte de toutes les circonstances du problème. La densité de l'air diminue à peu près *d'un dixième* à 800 mètres d'altitude et *d'un cinquième* à 2.000 mètres ; l'influence de telles diminutions est assez faible ; il n'en serait pas de même pour la diminution de moitié qui se produit à 5.500 mètres d'altitude ; mais on n'a pas encore volé au-dessus du Mont-Blanc. En attendant qu'on y parvienne, il pourra être intéressant d'utiliser l'aéroplane pour explorer des régions montagneuses mal pourvues de routes, au besoin même pour se rendre d'un point à un autre par-dessus une chaîne de montagnes qui ne serait percée d'aucun tunnel.

A côté de la montagne, on peut mentionner les régions désertiques, équatoriales ou polaires ; l'établissement de communications au-dessus de la mer, pour lesquelles les vitesses actuelles des aéroplanes dépassent déjà largement celles des meilleurs transatlantiques, etc. Mais nous n'avons pas à dresser un plan complet d'exploration du globe ; il suffit d'avoir fait pressentir, par quelques exemples, quels pourront être les premiers emplois utiles de l'aéroplane. Mentionnons simplement, pour terminer, l'idée déjà émise de transporter des ballots de lettres dont le poids pourrait être strictement réglementé ; la possibilité de telles applications montre l'importance d'un élément, jusqu'ici trop négligé dans les meetings d'aviation et cependant essentiel : le poids utile transporté.

LA RÉGLEMENTATION ADMINISTRATIVE. — Arri-

vera-t-on à empêcher ce développement de l'aéroplane, à l'aide de règlements administratifs ingénieusement combinés ? Il faut souhaiter que non ; mais il ne faut pas avoir une confiance excessive dans les bonnes dispositions des administrations à l'égard de toute nouveauté. Bien des habitudes seront évidemment bouleversées, et l'Administration n'aime pas qu'on dérange ses habitudes. Sans parler des douanes et des octrois, bien des questions juridiques pourront être soulevées, et il est à craindre que ce ne soit pas seulement par des humoristes ; dans quelle mesure le propriétaire d'un champ, ou d'un parc clos de murs peut-il interdire l'accès de l'atmosphère au-dessus de sa propriété ? On a déjà nommé des commissions, dont certains membres, intègres fonctionnaires plus soucieux d'assurer la tranquillité publique que de favoriser le progrès, ont proposé des textes invraisemblables d'après lesquels tout aviateur, comme d'ailleurs tout aéronaute, serait *a priori* considéré comme suspect et regardé comme coupable des pires méfaits (espionnage, contrebande, etc.) à moins qu'il ne puisse apporter la preuve certaine et indubitable de son innocence. Cette mise hors la loi n'a pas été admise et ne le sera sans doute jamais ; le fait seul qu'elle ait pu être sérieusement proposée est l'indice d'un état d'esprit qu'il convenait de signaler afin qu'il disparaisse [1]. (Depuis que ces lignes ont été écrites,

1. Par contre une réglementation qui deviendra utile dès que l'aéroplane se sera vulgarisé est celle de la route à tenir dans les croisements. Lorsque deux appareils se dirigeront l'un vers l'autre, ils ne pourront s'éviter qu'en prenant chacun leur droite : aucune

La commission [illegible] publics s'est engagée [illegible] qui promet [illegible]

[illegible] militaire

La question de [illegible] militaire [illegible] [illegible] d'abord en raison des préoccupations [illegible] [illegible] le problème [illegible] de la même [illegible] spécial [illegible] peut être envisagé [illegible] comme [illegible] véhicules [illegible]

L'AÉROPLANE COMME [illegible] A présent, un aéroplane peut rendre de grands services comme poste d'observation [illegible] d'une armée, soit au-dessus d'une place [illegible] pilote peut être accompagné d'un passager prenant des notes, des dessins, des photographies. Deux inconvénients mécaniques sont à signaler [illegible]

règle ne peut être donnée indiquant que l'un des [illegible] s'abaisser au moins, aucune règle [illegible] seule, on pourrait convenir que celui qui [illegible] lève par exemple, mais cette convention [illegible] nients. Au contraire, dans le cas où les [illegible] aisé d'imposer une convention telle que [illegible] aperçoit l'autre à sa droite au même niveau [illegible] passer par-dessus, celui qui aperçoit l'autre [illegible] dessous. On utiliserait ainsi la troisième dimension pour diminuer les chances de collision

d'ailleurs liés l'un à l'autre : la nécessité d'avoir du champ pour partir ; la difficulté de la marche lente. Nous avons déjà indiqué les avantages que pourraient présenter à ce double point de vue l'hélicoptère, ou une combinaison de l'hélicoptère avec l'aéroplane ; mais nous ne parlons ici que des appareils réalisés.

On a beaucoup discuté sur les avantages respectifs de l'aéroplane et du dirigeable. L'un des principaux mérites du dirigeable est la possibilité (non encore réalisée en France) d'y installer un poste de télégraphie sans fil et de transmettre ainsi les observations à l'instant même où elles sont faites ; de plus le dirigeable, au prix, il est vrai, d'une diminution rapide et irréparable de sa valeur, peut accomplir bien plus rapidement que l'aéroplane des mouvements dans le sens de la verticale ; voilà pour les avantages[1]. Mais le dirigeable est plus vulnérable que l'aéroplane ; il a une vitesse moins considérable, et résiste moins bien à un vent un peu fort.

L'AÉROPLANE COMME COMBATTANT. — On peut envisager à deux points de vue l'aéroplane combattant : la lutte dans les airs ; la lutte de l'air contre la terre. A défaut de tout renseignement expérimental, on risquerait fort, en parlant de la lutte dans les airs, de se laisser aller aux faciles improvisations de l'imagination littéraire ; tout

1. Le fait de pouvoir enlever un poids plus considérable (passagers ou engins de guerre) ne doit pas être regardé comme un avantage sans une discussion détaillée, car on ne peut comparer à ce point de vue *un* dirigeable avec *un* aéroplane.

au plus peut-on observer que la comparaison parfois faite de l'aéroplane avec le torpilleur et du dirigeable avec le cuirassé n'est pas du tout exacte ; le dirigeable manque de l'organe essentiel du cuirassé, à savoir de la cuirasse ; et il n'est pas possible qu'il puisse jamais l'acquérir. Laissant de côté la guerre aérienne, on peut se demander si un passager d'aéroplane peut combattre utilement un ennemi terrestre. Il peut tirer un coup de fusil, sans compromettre sérieusement l'équilibre, s'il s'est placé, comme il est naturel, au voisinage du centre de gravité de l'appareil[1] ; mais l'efficacité d'un tel tir serait évidemment trop faible pour qu'il y ait lieu de le prendre en sérieuse considération. Il n'en serait peut-être pas de même si l'on pouvait installer sur un aéroplane une mitrailleuse avec une ample provision de munitions ; mais les difficultés d'installation et d'équilibre pendant le tir (sans parler du réglage) sont ici très considérables ; ce ne sont là que des vues d'avenir sans base actuelle[2].

L'AÉROPLANE COMME VÉHICULE. — Enfin l'aéroplane peut être utilisé simplement comme un moyen pour transporter rapidement et sûrement, soit à l'intérieur d'une enceinte fortifiée, soit

1. Il y aurait évidemment lieu de corriger le tir en tenant compte de la vitesse de l'appareil.

2. Nous ne parlons pas du lancement de bombes et torpilles, sans efficacité sérieuse dans la guerre terrestre ; il pourrait ne pas en être de même dans l'emploi d'un aéroplane contre un cuirassé ; il faudrait toutefois auparavant acquérir une sûreté de manœuvre exceptionnelle.

au delà d'un bras de mer, des troupes d'infanterie. Ici, il est nécessaire de chiffrer approximativement la dépense. Un aéroplane à deux places vaut actuellement de 20 à 30.000 francs; il n'est pas téméraire de supposer que la construction par très grandes quantités peut permettre, d'ici peu d'années, d'obtenir pour 10.000 francs un aéroplane à 3 ou 4 places. Le coût de 25.000 appareils de ce genre serait donc d'environ 250 millions et une telle flotte aérienne pourrait transporter en une seule fois cent mille hommes. Il ne faudrait pas en conclure que l'Angleterre est à la merci d'un audacieux coup de main ; car une flotte aérienne pareille ne s'organiserait pas en secret et des moyens de défense aériens ou terrestres seraient immédiatement mis en œuvre pour l'arrêter en route ou empêcher son débarquement. Ce que l'on peut conclure de plus vraisemblable, c'est qu'un budget nouveau va s'ajouter d'ici peu aux budgets de la guerre terrestre et de la guerre navale. Qu'il nous soit permis de songer seulement ici aux conséquences heureuses qui peuvent en résulter : en développant l'aviation par des subventions considérables, on facilitera toutes ses applications ; le budget de l'aviation militaire se présente donc comme un budget essentiellement productif, car les dépenses qui y seront inscrites contribueront à la fois au développement de la richesse nationale et à l'essor pacifique de l'humanité.



NOTE I

THÉORIE DE L'AÉROPLANE

Remarques sur les moteurs à explosion.

Considérons un moteur à explosion marchant régulièrement, et soit N le couple moyen sur l'arbre pendant la durée τ d'un cycle. Si ω est la vitesse moyenne de rotation de l'arbre, le travail moteur pendant un cycle est $N\omega\tau$ ou $N\alpha$, α désignant l'angle dont tourne l'arbre pendant un cycle (angle indépendant de la vitesse de marche). Quelle que soit la vitesse de marche, la même quantité de combustible [pétrole, etc.] est sensiblement employée pendant un cycle : si on admet que la combustion est aussi parfaite et plus généralement l'utilisation aussi bonne dans la marche à grande vitesse que dans la marche à petite vitesse, le travail moteur $N\alpha$, par suite le couple moteur N, est le même quelle que soit la vitesse de marche ω : N ne dépend que de la masse comburée [c'est-à-dire du nombre, de la hauteur et du diamètre de base (alésage) des cylindres], — de la quantité du comburant, et de l'agencement des organes. La puissance $N\omega$ du moteur est proportionnelle à la vitesse de marche ω ; elle serait donc indéfinie si les organes de la machine supportaient une vitesse indéfinie.

En réalité, l'utilisation du combustible diminue quand la vitesse de marche devient considérable, la combustion est incomplète, les défauts des organes s'accentuent ; les joints sont moins étanches, les frottements et les chocs augmentent. Il est enfin une limite de vitesse, soit ω_1, que les organes ne peuvent supporter sans se fausser ou se rompre. N est donc, non pas une constante, mais une fonction décroissante de ω qui, quand ω tend vers ω_1 tend rapide-

ment vers zéro. La puissance $P = N\omega$ croît d'abord avec ω, passe par un maximum et tend aussi vers zéro pour $\omega \rightarrow \omega_1$. Les courbes des N et des P en fonction de ω ont l'aspect ci-dessous. La figure de gauche représente la courbe des N et la figure de droite la courbe des P.

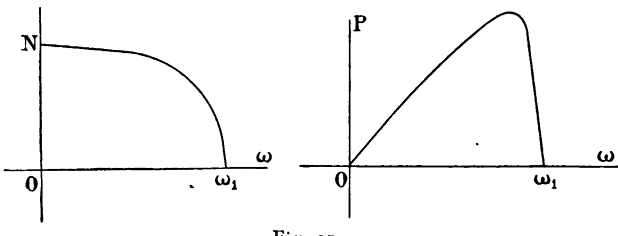


Fig. 27.

Le rendement industriel est défini par $\frac{N\alpha}{\Phi}$, Φ désignant le nombre de calories que dégagerait la combustion complète de la masse de pétrole dépensée pendant un cycle. Il est donc sensiblement proportionnel à N.

Un moteur doit être construit pour fonctionner à une vitesse normale Ω. S'il est bien construit, cette vitesse doit correspondre assez sensiblement au maximum de P et en même temps N doit être, pour cette vitesse Ω, peu inférieur à sa valeur maxima [valeur correspondant aux petites vitesses de marche] Quand ces conditions sont réalisées, le régime normal du moteur emploie sensiblement sa puissance maxima avec le rendement optimum. C'est ce que nous appellerons le régime optimum[1].

Dans les moteurs légers fabriqués ces dernières années, N est très sensiblement constant pour $\omega < \omega_1$ et tombe brusquement à zéro pour $\omega = \omega_1$. Les graphiques de N et de P sont alors schématiquement ceux de la figure 28.

La puissance maxima du moteur sera sensiblement $N\omega_1$; ω ne pourra dépasser ω_1; le rendement sera sensiblement

1. Il faut que le moteur puisse conserver ce régime sinon indéfiniment, du moins un temps très long. Le défaut d'un grand nombre de moteurs ultra-légers est de ne pouvoir garder que très peu de temps leur soi-disant régime optimum.

le même, pour ω quelconque (mais compris entre o et ω_1). Le régime ω voisin de ω_1 sera le régime optimum. Nous admettons dans ce qui suit, que les moteurs employés rentrent dans cette catégorie[1]. La substitution des graphiques

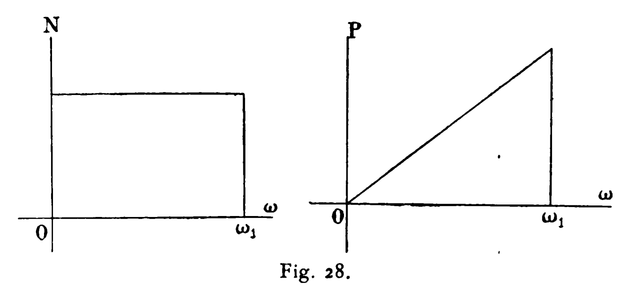


Fig. 28.

27 aux schémas 28 compliquerait la théorie sans la modifier profondément.

APPLICATIONS A L'AUTOMOBILE. — Dans une automobile, le couple moteur est appliqué aux roues d'arrière, chaque roue d'avant étant libre. L'arbre du moteur tournant à la vitesse ω, les roues d'arrière [les virages exceptés] tournent avec une vitesse $\rho = \lambda\omega$, λ désignant un certain facteur numérique qui dépend des engrenages interposés. Ce facteur change chaque fois qu'on met en jeu un « changement de vitesses », c'est-à-dire quand on change le jeu d'engrenages interposé entre l'arbre moteur et les roues.

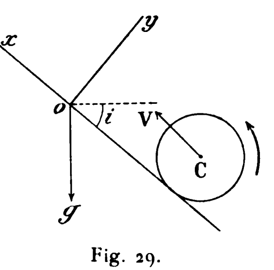


Fig. 29.

1. D'après les expériences de M. Arnoux, pour les moteurs d'automobiles, N serait une fonction linéaire décroissante de ω, soit $N = a - b\omega$, et ω_1 serait égal à $\frac{a}{b}$; la seconde courbe 29 serait une parabole. En fait, les graphiques vrais seraient intermédiaires entre ceux de M. Arnoux et les schémas (28).

Soit C le milieu des centres des roues d'arrière, C' le milieu des centres des roues d'avant ; supposons la voiture animée d'un mouvement de translation parallèle à la direction fixe CC', sur un plan horizontal ou sur un plan incliné dont la ligne de plus grande pente ascendante a le sens CC'. Je prends comme axe Ox la projection de CC' sur le sol, comme axe Oy la normale au sol menée vers le haut ; j'appelle i l'inclinaison de la route sur le plan horizontal $\left(0 \leq i < \frac{\pi}{2}\right)$. Nous admettons que le mouvement a lieu sans glissement.

Soit F la somme positive ou négative des projections sur Ox des réactions du sol sur les roues d'arrière ; les projections analogues relatives aux roues d'avant sont négligeables si on néglige la masse de ces roues devant la masse totale M de la voiture.

Nous représenterons par V (t) la vitesse de l'automobile, par KV^2 la résistance de l'air.

D'autre part, considérons le système Σ formé par les deux roues motrices, leur essieu et l'arbre moteur ; leur force vive se réduit sensiblement [1] à $mk^2\rho^2$, mk^2 désignant le moment d'inertie total des deux roues autour de leur axe commun.

On obtient facilement [2] :

$$(1) \quad \left(M + m\frac{k^2}{l^2}\right)\frac{dV}{dt} = \frac{N}{l\lambda} - Mg \sin i - KV^2 .$$

1. La force vive des organes de transmissions [qui dépend de λ] est négligeable devant $mk^2\omega^2$, et mk^2 est lui-même très petit devant Ml^2.

2. En effet, le théorème du mouvement du centre de gravité projeté sur Ox donne :

$$(\alpha) \qquad M\frac{dV}{dt} = F - Mg \sin i - KV^2.$$

De plus le théorème des forces vives appliqué au système Σ donne en négligeant les frottements intérieurs et en remarquant que le couple moteur (dont la valeur absolue est N) a le sens négatif :

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}\, mk^2\rho^2 = -N\omega + Fl\rho,$$

D'après cela pour que la voiture puisse démarrer, il faut :

$$N > \lambda Mgl \sin i; \qquad (2)$$

D'après la discussion connue des équations de la forme (1) quand la condition (2) est remplie, V tend vers la vitesse limite [1].

$$V_1 = \sqrt{\frac{N}{Kl\lambda} - \frac{Mg \sin i}{K}}$$

Si la voiture démarre sur route horizontale, i est nul, la condition (2) est toujours remplie, et la vitesse V_1 qu'atteint la voiture est $W_1 = \sqrt{\frac{N}{Kl\lambda}}$; le régime une fois établi, on a :

$$\omega^2 = \frac{N}{Kl^3 \lambda^3} .$$

La voiture doit être construite et λ choisi de façon que cette valeur ω corresponde au régime optimum du moteur. La voiture ne pourra monter une côte de pente i que si la condition (2) est remplie ; la nouvelle vitesse de régime V_1, soit W_2, sera $< W_1$, et la vitesse de marche du moteur $\omega' = \frac{W_2}{l\lambda}$ sera plus lente que la précédente. Si on veut que ω ne soit pas modifié, on fait jouer un *changement de vitesse*

ou encore

$$mk^2 \frac{d\rho}{dt} = -\frac{N}{\lambda} + Fl.$$

Mais, d'autre part, l désignant le rayon d'une roue on a : $V = -l\rho$ $[\rho < 0]$, d'où :

$$m \frac{k^2}{l^2} \frac{dV}{dt} = \frac{N}{l\lambda} - F. \qquad (\beta)$$

L'équation (1) du texte s'obtient en ajoutant membre à membre les équations (α) et (β).

1. V tend vers V_1, lorsque t augmente indéfiniment ; en fait, V est sensiblement égal à V_1, au bout d'un temps assez court.

qui substitue à λ une quantité moindre λ', et on devra avoir :

$$\omega^2 = \frac{N}{Kl^3\lambda^3} = \frac{N}{Kl^3\lambda'^3} - \frac{Mg \sin i}{Kl^2\lambda'^2} \quad , \text{ou}$$

$$\lambda'^3 = \lambda^3 \left[1 - \frac{Mgl \sin i}{N} \lambda'\right] \quad ,$$

équation en λ' qui admet une racine positive, et une seule, inférieure à λ et à $\frac{N}{Mgl \sin i}$. La limite correspondante de la vitesse est :

$$W_3 = \sqrt{\frac{N}{Kl\lambda'} - \frac{Mg \sin i}{K}} \; ;$$

elle est inférieure à W_1, [car $W_3 = l\lambda' \mid \omega \mid < l\lambda \mid \omega \mid = W_1$], et supérieure à W_2 [puisque $\lambda' < \lambda$].

Avec quatre changements de vitesse, par exemple, on peut faire en sorte que les variations du régime ω correspondant aux diverses pentes soient très faibles[1].

Cette discussion suppose que le moteur est mis en marche une fois embrayé : s'il est mis en marche désembrayé, la rotation de l'arbre moteur s'accélère un peu au delà de ω_1, et quand l'embrayage a lieu, il y a choc entre l'arbre moteur et les organes qui commandent les roues motrices.

Les lois de la résistance de l'air.

Résistance d'un liquide incompressible. — ***Principe de la relativité.*** — Considérons une vaste masse d'eau M dans des conditions de température et de densité données, et un solide S mobile à l'intérieur de cette masse. Les pressions que l'eau exercent sur S peuvent être remplacées

1. Nous avons admis que les roues de l'automobile roulaient sans glisser sur le sol. Cette condition est toujours remplie sensiblement pour les roues libres : pour les roues motrices, il en est de même dans les applications, comme le montre un calcul que nous omettons (i restant assez faible).

par une force R appliquée en G (centre de gravité de S) et un couple d'axe Γ. On admet que ces forces ne dépendent que des vitesses relatives de S et de l'eau. Par exemple, supposons que la masse M soit immobile par rapport au sol et qu'on anime S dans l'eau d'un mouvement de translation de vitesse $\overline{V}$: les réactions de l'eau sur S seront les mêmes que si S, immobile, recevait un courant d'eau de vitesse — $\overline{V}$.

Toutefois cette conclusion suppose que c'est le même régime relatif qui s'établit effectivement. Or, dans un liquide visqueux [et c'est la viscosité qui est la cause essentielle de la résistance], le régime qui s'établit, en supposant le liquide primitivement immobile, dépend de la manière dont S est mis en mouvement. Dans les expériences réelles où on met S en mouvement et dans celles où l'on emploie un courant d'eau, les conditions d'établissement du régime *relatif* sont toujours très différentes ; il n'est donc point surprenant que ce régime diffère dans les deux cas, et que le principe énoncé de relativité semble mis en défaut par l'expérience, mais ce n'est là qu'une apparence.

Résistance d'un liquide a un plan mince. — Considérons un jet liquide qui arrive avec une vitesse V sur un plan mince immobile Π selon une incidence i et frappe l'aire A de ce plan, le système tout entier étant immergé dans l'air à la pression normale. On sait que la réaction qui s'exerce sur le plan est une force normale au plan, dirigée du côté opposé à la veine et égale à $\rho A V^2 \sin^2 i$, ρ désignant la densité du liquide.

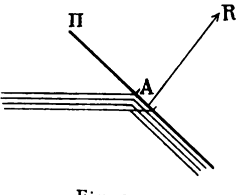


Fig. 30.

Supposons Π immergé tout entier dans un courant liquide de vitesse $\overline{V}$, la pression du liquide à une bonne distance de Π étant sensiblement constante : si on admet qu'on puisse assimiler le phénomène au cas du jet liquide, les réactions du liquide sur Π admettent une résultante R, normale à Π, appliquée au centre de gravité de l'aire

totale A du plan et égale à $\rho AV^2 \sin^2 i$. En particulier, si V est normal à Π, R est égal à ρAV^2. C'est la formule admise dans le cas de $i = \frac{\pi}{2}$, pour d'autres raisons théoriques et expérimentales, par von Lœssl.

Mais il est bien évident qu'une telle assimilation est des plus critiquables. Par exemple, dans le cas de $i = \frac{\pi}{2}$, la déviation du courant vers les bords du plan n'est point de 90° mais très atténuée. La résistance calculée ρAV^2 doit donc être trop grande. D'autre part, on ne tient aucun compte de la dépression qui doit sûrement se former en arrière du plan.

Un autre raisonnement, dû à Newton, conduit à admettre que, pour $i = 90^\circ$, R est égal à la moitié de la valeur précédente. Ce raisonnement se résume ainsi : imaginons l'eau immobile et Π animé de la vitesse de translation $\overline{V}$ normale à Π. La masse d'eau m balayée par π entre les instants t et $t + dt$ et à laquelle il communique la vitesse V est $\rho A dt$; la force vive qui est ainsi imprimée à cette masse par les réactions du plan est $mV^2 = \rho AV^3 dt$, et elle est égale au double du travail des réactions, c'est-à-dire $2RVdt$; d'où :

$$R = \frac{\rho AV^2}{2}$$

Il est inutile de signaler les vices de ce raisonnement, l'évaluation fautive du travail des réactions pendant un choc, l'oubli du travail des réactions exercées sur la masse m par le reste du liquide, etc.

La loi du sinus et la loi du sin². — Quoi qu'il en soit, des raisonnements de cette nature ont fait admettre par Newton et par de nombreux savants à sa suite, que dans le cas d'un fluide quelconque [liquide ou gaz] R est de la forme : $\lambda \rho AV^2 \sin^2 i$, λ désignant un certain coefficient numérique caractéristique du fluide [*loi du sinus carré*]; guidé par d'autres raisonnements, Euler admettait, au contraire, que R est égal à $\lambda \rho AV^2 \sin i$ [*loi du sinus*]. Une série d'expériences de Borda, patronées entre les années 1790-1800 par l'Académie des sciences de Paris, justifiait le point de

vue d'Euler. Dès l'année 1805, le mécanicien anglais, sir G. Cayley, publiant la première théorie de l'aéroplane, s'appuyait sur la loi du sinus *établie par les expériences de l'Académie des sciences de Paris.* Au XIX[e] siècle, les expériences de Thybaut, Duchemin, etc., confirmaient la loi du sinus, et dès l'année 1873, le mathématicien français Penaud, constructeur du premier aéroplane réduit qui ait volé [1], énonçait sous une forme très précise toutes les lois de la résistance d'un fluide à un plan mince, telles qu'elles sont admises par les aviateurs d'aujourd'hui d'après les expériences les plus récentes.

Nous allons énoncer, pour l'air, ces lois qui sont applicables à un fluide quelconque.

LOIS EMPIRIQUES DE LA RÉSISTANCE DE L'AIR A LA TRANSLATION D'UN PLAN MINCE. — Nous supposons l'air immobile et le disque plan Π animé d'un mouvement de translation de vitesse $\overline{V}$. Les résistances de l'air sur le plan sont sensiblement normales à Π et dirigées du côté de Π opposé à $\overline{V}$; elles admettent donc une résultante, soit $\overline{CR}$, normale à Π et appliquée en un certain point C qu'on appelle le centre de pression.

PREMIER CAS. V EST NORMAL AU PLAN π. — *Loi du carré de la vitesse.* — Pour un disque plan donné, C est le centre de figure de l'aire A [centre de gravité de l'aire considérée comme homogène], et la résistance R croît [2] sensiblement comme le carré de la vitesse.

Loi de la similitude. — Quand on change les dimensions du disque en le laissant semblable à lui-même, R croît sensiblement comme l'aire A du disque.

Influence de la forme du disque. — La résistance de l'air sur deux disques, de même aire A, animés de la vitesse normale V, est plus grande pour les disques assez allongés que pour les disques ronds ou carrés. Elle est maxima quand l'aire A a sensiblement la forme d'un rectangle dont la longueur est environ cinq ou six fois plus grande que la largeur.

1. Voir chapitre I.

2. L'air étant dans les mêmes conditions de température et de pression.

Valeur numérique de la résistance à la translation normale d'un plan mince. — Soit ρ la densité mécanique de l'air (masse de l'unité de volume d'air) dans les conditions d'expérience ; posons

$$R = \lambda \rho A V^2 ;$$

la quantité λ est de dimensions nulles, indépendante par conséquent du choix des unités. D'après Newton, λ serait égal à $1/2$, d'après les raisonnements de la page 185, il serait égal à 1. D'après Morin, Robert, Didion, von Lœssl, ce dernier nombre serait assez exact. Mais d'après les expériences plus récentes, plus variées et portant sur une plus grande échelle de vitesses, [expériences de Cailletet et Colardeau, d'Eiffel, etc.], λ serait compris entre 0,55 et 0,64, selon la forme et les dimensions de la surface, et ce pour des vitesses variant de zéro à 40 mètres par seconde [1].

Admettons comme valeur approchée de λ la valeur 0,64. D'autre part, à la température de 15°, à la pression de 760mm [conditions normales], ρ en unités C. G. S. est égal à $0{,}00125 = \frac{1}{800}$. D'où la formule :

$$R = \frac{0{,}64}{800} A V^2 \qquad \text{(en C.G.S.).} \tag{1}$$

1. Les lois précédentes ne sont qu'assez grossièrement approchées. D'après les expériences d'Eiffel, pour un disque donné le rapport $\frac{R}{V^2} = \mu$ n'est pas constant, mais décroît quand V croît de zéro à 33 mètres, et croît ensuite avec V, les variations *relatives* de μ entre $V = 26$ et $V = 40$ mètres étant de $\frac{1}{73}$ environ. Au voisinage de $V = 33$ mètres (ou 130 kilomètres à l'heure) μ passe par un minimum et reste sensiblement constant.

De même, l'accroissement de R avec les dimensions des surfaces *semblables*, est plus marqué que ne l'indique la loi de similitude. Tatin propose d'admettre que R croît proportionnellement non pas à A, mais à $A^{1,1}$. D'après Eiffel, cette correction est trop élevée : $\frac{R}{AV^2}$ croît lentement quand l'aire A, d'abord petite, commence à croître, mais semble tendre vers une constante quand les dimensions de A deviennent grandes.

Au système C. G. S. substituons le système L. F. T. où l'unité de longueur est le mètre, l'unité de force F le kilogramme poids à Paris, l'unité de temps T la seconde et soient R', A', V' les nouvelles mesures de R, A, V. On a :

$$R = 981.000\ R', \quad A = 10^4\ A', \quad V = 10^2\ V',$$

d'où :

$$R' = KA'V'^2, \quad \text{avec} \quad K = 0{,}082.$$

Ce sont ces unités que nous adopterons dans ce qui suit, en prenant [vu l'incertitude des expériences] K = 0,08. Nous représentons donc dorénavant par R la résistance mesurée en kilogramme-poids, par A l'aire en mètres carrés de la paroi mince, par V la vitesse par secondes en mètres, et nous admettons comme formule de résistance à une translation normale :

$$R = KAV^2, \quad \text{avec} \quad K = 0{,}08. \tag{2}$$

K est la résistance que rencontre dans l'air aux conditions normales un rectangle d'un mètre carré de surface, animé d'une vitesse de 1 mètre à la seconde perpendiculaire à son plan ; cette résistance est égale à 80 grammes.

Loi des densités. — Quand la température et la pression de l'air diffèrent des conditions normales, on admet que, toutes choses égales d'ailleurs, R varie proportionnellement à la densité de l'air. Autrement dit, soit ϖ le poids d'un mètre cube d'air à la température et à la pression de l'expérience, et soit g l'accélération de la pesanteur ; R est donné pour des disques semblables par la formule

$$R = \lambda \frac{\varpi}{g} AV^2, \tag{3}$$

λ désignant un coefficient qui ne dépend que de la forme du disque. Pour les formes rectangulaires que nous considérons, λ est égal à 0,64.

La formule définitive que nous emploierons sera donc :

$$R = 0{,}64 \frac{\varpi}{g} AV^2. \tag{4}$$

Elle est vraie quel que soit le système d'unités L. F. T. adoptées si ϖ désigne le poids de l'unité du volume d'air ; en particulier, si l'air est aux conditions normales et si le système L. F. T. sont le mètre, le kilogramme poids et la seconde, la formule (4) coïncide avec la formule (2).

RÉSISTANCE DE L'AIR A LA TRANSLATION D'UN PLAN MINCE INCLINÉ. — Soit i l'angle aigu (que nous appellerons angle d'attaque) de la vitesse $\overline{V}$ avec le plan Π du disque ; soit O le centre de figure, OD la projection de V sur Π. Quand le disque donné est un cercle, R ne dépend[1] que de i et de la valeur absolue de V ; mais quand le disque est, par exemple, un rectangle, R dépend non seulement de i et de V mais de la direction de OD par rapport au disque. Toutes choses égales d'ailleurs, R est plus grand quand OD est perpendiculaire au grand côté du rectangle que quand il est perpendiculaire au petit. Ceci se conçoit aisément : c'est surtout par les deux côtés latéraux que l'air tend à échapper à la déviation que lui impose le plan, et il s'échappera d'autant plus facilement que la longueur de ces deux côtés sera plus grande par rapport au périmètre total du rectangle.

Le vecteur $\overline{V}$ étant donné en grandeur et direction par rapport au disque, l'observation montre que R, pour les petites inclinaisons, varie proportionnellement à i ou $\sin i$ [et non à $\sin^2 i$], et reste sensiblement constant à partir d'une certaine valeur i_0 de i. Quant au centre de pressions C, à mesure que i diminue, il vient en avant du disque par rapport au centre de figure O, et tend vers une certaine position limite C_0 quand i tend vers zéro. Mais des expériences précises n'ont été faites que dans le cas où le disque est symétrique par rapport à OD ; dans ce cas, il est évident, par raison de symétrie, que C est sur la droite OD ; quand i varie de 90° à zéro, C varie sur OD à partir de O en se rapprochant du bord antérieur, et tend vers une position C_0 pour i tendant vers zéro.

Cas du rectangle. — Si le plan Π est un rectangle, ceci

1. L'air étant dans des conditions données de température et de pression.

s'applique au cas où $\overline{V}$ est perpendiculaire à un des côtés. Soient OA et OB les parallèles aux côtés du rectangle menées par son centre O; supposons V et *i* constants et faisons varier OD de OA à OB; C passe d'une position C_1 sur OA à une position C_2 sur OB, et décrit une courbe située dans l'angle AOB, courbe qui admet OA et OB comme axes de symétrie. En particulier [et cette remarque est importante pour les applications], si OD fait un petit angle avec OA, on peut remplacer les réactions de l'air par la force $\overline{R}$ appliquée en C_1 et un couple formé par les deux forces $\overline{R}$ et $-\overline{R}$ appliquées respectivement aux points C et C_1 ; l'axe de ce couple est sensiblement parallèle à OC_1 et il a le même sens que si C était sur la demi-droite OD (à l'intersection C′ de OD et du cercle de centre O et de rayon OC_1). Dans une discussion qualitative, mais non quantitative, on peut donc admettre (et c'est ce que nos ferons plus loin) que C coïncide avec C′.

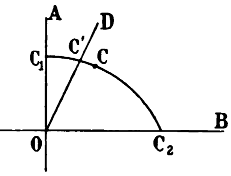


Fig. 23.

Lois de la résistance pour un plan rectangulaire oblique animé d'une translation perpendiculaire au grand côté. — Quand V est perpendiculaire à l'un des côtés du rectangle, les résultats acquis jusqu'à ce jour se résument ainsi.

I. *Loi du sinus (perfectionnée). — Pour les angles i ne dépassant pas 30°, R (toutes choses égales d'ailleurs) varie proportionnellement à sin i et R reste sensiblement constant pour i variant de 30° à 90°.*

Si R_{90} est la résistance pour V normal au plan, cette loi se traduit par les égalités suivantes *dans le cas d'un carré.*

$$(5)\quad \begin{cases} R = 2\, R_{90} \sin i \text{ pour } i \leqq 30^\circ \\ R = R_{90} \text{ pour } i \text{ compris entre } 30^\circ \text{ et } 90^\circ. \end{cases}$$

ou encore

$$(6)\quad \begin{cases} R = 1{,}28\, \dfrac{\varpi}{g}\, AV^2 \sin i \text{ pour } i \leqq 30^\circ\ , \\ R = 0{,}64\, \dfrac{\varpi}{g}\, AV^2 \quad \text{pour } i \text{ compris entre } 30^\circ \text{ et } 90^\circ. \end{cases}$$

La première formule (6) peut encore s'écrire (V_n désignant la composante de $\overline{V}$ normale au plan) :

$$(6\ bis) \qquad R = 1{,}28\ \frac{\varpi}{g}\ VV_n\ .$$

Remarquons que pour les faibles inclinaisons, la réaction est *double* de celle que donne la loi du sinus : $R = \sin i\ R_{90}$, appliquée à toutes les valeurs de i.

Pour un *rectangle très allongé attaquant l'air par son grand côté*, les valeurs d'Euler sont triplées, au lieu d'être doublées et l'on a sensiblement :

$$(6\ ter) \qquad R = 2\ \frac{\varpi}{g}\ AVV_n\ .$$

ou $R = 3 \sin i\ R_{90}$ pour i petit.

L'*envergure* (ou grande dimension de l'arête d'attaque par rapport à l'autre dimension) accroît donc beaucoup R pour une surface S donnée. La formule (6 *ter*) s'applique si l'arête d'attaque égale 5 ou 6 fois l'autre côté (*surfaces d'aviation*). Si le rectangle attaquait l'air par *son petit côté*, la formule d'Euler $R = \sin i\ R_{90}$ s'appliquerait.

II. *Variations du centre de poussée.* — (Lois d'Avanzini et de Joëssel). — Soit $2\ l$ la petite dimension du rectangle, x la distance de C au bord antérieur du plan, on a :

$$(7) \qquad x = \frac{l}{5}\left[2 + 3 \sin i\right] \cdot$$

Les variations de C sont connues depuis longtemps des constructeurs de navires. La loi précédente a été adoptée en 1870 par l'ingénieur du génie maritime Jœssel à la suite d'une série d'expériences concernant surtout des plans carrés. D'après cette loi, pour les très petites incidences, C serait à une distance du bord antérieur égale à $\frac{2\ l}{5}$.

D'autres lois ont été proposées par Rayleigh, Kümmer, Langley, Soreau, etc. Pour les rectangles employés en aviation, la position du centre des pressions correspondant

aux très petits angles est assez bien donnée par la formule de Jœssel $x = \frac{2l}{5}$. D'après certains expérimentateurs (G. Voisin notamment), C varie aussi et se rapproche du bord antérieur quand V croît : il faudrait dans (7) multiplier le second membre par un facteur peu différent de 1 et décroissant quand V croît.

Plan animé d'un mouvement quelconque. — Les lois des pages 188-192 ne nous apprennent rien sur les résistances que rencontre un plan animé d'un mouvement quelconque, par exemple tournant autour d'un axe fixe. Un procédé qu'on emploie souvent consiste à sommer les pressions que l'air exerce sur chaque élément $d\sigma$ du plan, en admettant que chaque pression élémentaire est la même que si $d\sigma$ était seul et animé d'une vitesse de translation W, [W vitesse vraie de l'affixe P de l'élément]. Mais une telle hypothèse est grossièrement inexacte : si elle était vraie le centre des pressions, dans le cas du simple mouvement de translation, coïnciderait toujours avec le centre de figure.

Il est toutefois des cas simples où ce mode de calcul peut donner du moins une indication.

Considérons un rectangle $abcd$ ou Π, d'aire A, dont le grand côté ab est horizontal et qui est animé d'une vitesse de translation V horizontale, perpendiculaire à ab et faisant avec la direction ascendante ca du petit côté un angle très faible i. Animons le plan Π d'une rotation autour d'une droite parallèle à ab et située dans le plan π en avant de ab; à une distance h de O, [fouettement de la queue d'un oiseau]. Soit ω la vitesse angulaire de cette rotation, dont le sens est tel qu'elle accentue l'inclinaison de Π; nous supposons la quantité ωh ou V_1 [vitesse commu-

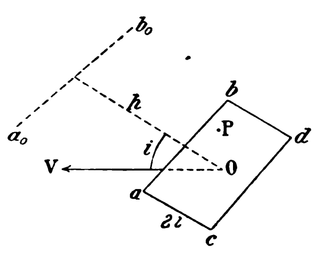


Fig. 32.

niquée à O par la rotation] très petite devant V, mais non pas devant V sin i. La vitesse W d'un élément $d\sigma$ du plan d'affixe P est peu différente de V en valeur absolue, et sa composante normale W_n est $V \sin i + \omega r$, r désignant la distance de P à $a_0\, b_0$. Si on admet le mode de calcul ci-dessus, la pression qui s'exerce sur l'élément $d\sigma$ d'affixe P est sensiblement augmentée [formule 6 *ter*] de

$2\,\frac{\varpi}{g}\,V\omega r d\sigma$; la réaction totale R croît[1] donc de

$2\,\frac{\varpi}{g}\,AV\omega h = \alpha R_0$, si R_0 désigne la réaction pour

$\omega = 0$ et α le rapport $\frac{h\,\omega}{V \sin i}$ ou $\frac{V_1}{V \sin i}$. De plus, le centre de pressions C recule d'une longueur égale à $0{,}6\, l\, \frac{\omega h}{V}$.

Par exemple, si $V = 20^m$, $h = 10^m$, $l = 1^m$, $i = 5^o$ et si le plan fait deux tours à la minute, R est plus que doublée par la rotation ω et le centre C recule de 7 centimètres.

Il est bien certain que ces conclusions sont exactes au moins *qualitativement*, et même assez approchées quant à l'évaluation de R si ω n'est pas trop grand. Elles expliquent, comme nous le verrons plus loin, le rôle amortisseur de la queue[2].

Résistance de l'air a la translation d'un corps quelconque. — Soit maintenant S un corps solide de forme quelconque animé d'un mouvement de translation. Comment calculer les résistances que l'air lui oppose? Obtiendra-t-on une évaluation acceptable de la somme géométrique $\overline{R}$ de ces résistances, en adoptant le mode de calcul du numéro précédent et en appliquant la loi du sinus à chaque élément de surface frappé par l'air?

1. Si le plan II tourne en sens inverse, R *décroît* de la même quantité pour la même valeur absolue de ω et change de sens quand ω est suffisamment grand; le centre de pression avance sur le plan II.

2. Des remarques analogues s'appliqueraient à une rotation autour d'une parallèle aux petits côtés du rectangle [battement d'aile du haut en bas].

La comparaison avec l'expérience montre que la force $\overline{R}$ ainsi calculée est en général très différente de la réaction vraie. Dans certains cas, l'écart est assez faible. Dans d'autres cas, la loi du $\sin^2$ conduit à des résultats plus exacts. Mais dans la plupart des cas, aucune des deux lois ne donne une détermination approchée de $\overline{R}$.

Il est chimérique d'espérer formuler une loi élémentaire faisant connaître, même grossièrement, la pression subie par un élément $d\sigma$ d'une surface solide, d'après la seule donnée de V et de i [inclinaison de V sur $d\sigma$], et sans rien savoir quant au reste de la surface. Lorsqu'un solide se meut parallèlement à lui-même dans l'air calme, les mouvements et les pressions de l'air au voisinage de sa surface S dépendent de l'étendue et de la forme intégrales de la surface S, et la pression que subit chaque élément de S dépendra non seulement de V et i, mais de tout le reste de S.

La surface S étant donnée ainsi que l'orientation de $\overline{V}$ par rapport à S, l'expérience montre que la somme géométrique $\overline{R}$ des réactions de l'air sur S croît proportionnellement[1] à V^2 [*Loi du carré de la vitesse*]. Si on compare deux surfaces semblables, $\overline{V}$ gardant la même valeur et la même orientation par rapport à S, les deux forces $\overline{R}$ sont dans le même rapport que les aires des deux surfaces, c'est-à-dire proportionnelles au carré de leurs dimensions [*Loi de similitude*].

Quand S est une sphère, R est indépendant de l'orientation de $\overline{V}$, tandis que dans les autres cas elle varie très notablement avec cette orientation.

Lorsque S présente un plan de symétrie, et que V est contenu dans ce plan, il est évident par raison de symétrie que les réactions de l'air admettent une résultante unique $O\overline{R}$ située dans le même plan; le point d'application de cette résultante doit être déterminé expérimentalement. Dans les autres cas, ces réactions équivalent *à une force et à un couple.*

1. L'air étant dans des conditions données de température et de pression.

Lorsque S présente un axe de symétrie OZ auquel $\overline{V}$ est parallèle, les réactions de l'air admettent une résultante unique OR dirigée selon cet axe, en sens inverse de V. Si on pose alors $R = cV^2$, il suffit de connaître la constante c pour que $\overline{OR}$ soit entièrement déterminée[1]. C'est ce qui a lieu notamment quand la surface S est *de révolution* autour de OZ.

Principe du fuselage. — L'étude expérimentale de ce dernier cas a mis en évidence l'influence sur R non seulement de la forme avant du projectile, mais encore de la forme arrière. Appelons A l'aire du parallèle maximum de S (*Maître couple*) ; pour A donné, on sait depuis longtemps qu'on diminue la résistance (à égale vitesse) en fuselant l'avant, c'est-à-dire en lui donnant la forme d'un obus assez allongé. Mais il est bien établi aujourd'hui qu'on diminue cette résistance en fuselant aussi l'arrière. (Principe du fuselage du colonel Renard.) Les dirigeables, les sous-marins, les projectiles Lebel sont fuselés, non seulement à l'avant[2], mais à l'arrière. Pour les dirigeables, on préconise même des formes assez arrondies à l'avant et plus fuselées à l'arrière [forme des poissons à grosse tête et très rapides[3]]. Des recherches approfondies sont encore nécessaires à ce sujet.

Le rôle du fuselage d'avant s'explique de lui-même puisqu'il atténue considérablement les chocs de l'air sur S et les déviations des filets d'air. Le rôle du fuselage d'arrière s'explique ainsi : il se crée à l'arrière du corps une dépression qui tend à se combler ; les filets fluides viennent se

1. Si V change de sens par rapport à oz (c'est-à-dire si l'avant du projectile devenant l'arrière), c change en général de valeur.

2. Il convient, d'après certaines expériences, de terminer le fuselage non par une pointe, mais par une forme un peu émoussée. On conçoit qu'une pointe aiguë, à l'endroit où elle déchire l'air et le disperse en tous sens, crée un état singulièrement perturbé et peu propre à l'établissement d'un régime stable. C'est ainsi que l'avant du projectile Lebel, se termine par un petit méplat.

3. M. Frédéric Houssay a fait récemment d'intéressantes études expérimentales sur la forme des poissons. Voir notamment *Revue générale des Sciences*, 1909, p. 943.

fermer en quelque sorte sur l'arrière du corps, comme l'indique la figure 33. Si l'arrière de S est plat ou rentrant, la pression de l'air sur l'arrière est très diminuée, et cette dépression à l'arrière contribue avec la surpression à l'avant à engendrer la résistance R. Si au contraire S est fortement bombé, ou mieux, fuselé à l'arrière, les filets d'air qui aboutissent violemment à l'arrière atténuent ou suppriment la dépression : d'où diminution de R. Dans le cas d'un liquide incompressible parfait, les pressions d'arrière contrebalancent exactement, comme on le sait, les pressions d'avant et la résistance est nulle.

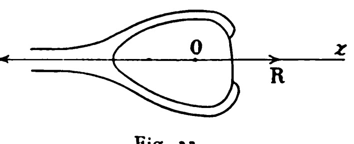


Fig. 33.

Toutes les considérations qui précèdent s'étendent évidemment au cas beaucoup plus compliqué encore où le corps S est animé de mouvements quelconques (rotations, etc.) Elles entraînent une conclusion importante au sujet des théories qui veulent évaluer la résistance que rencontre un plan mince : toute théorie qui ne tient pas compte de ce qui se passe à l'arrière du plan est inexistante.

LES FROTTEMENTS DE L'AIR. — Dans tout ce qui précède, nous avons admis que les réactions de l'air sur la surface du solide étaient normales à cette surface. En réalité, de par la viscosité de l'air, les réactions normales s'accompagnent de réactions tangentielles beaucoup plus faibles.

Tenons compte de ces frottements dans le cas d'un plan mince rectangulaire II, animé d'une translation perpendiculaire au grand côté. Par raison de symétrie, les réactions de l'air admettent[1] une résultante unique CR dont la composante normale au plan, soit R_n, est (p. 192).

$$(8) \qquad 2 \frac{\varpi}{g} AV^2 \sin i = R_n \ ;$$

1. Si la translation avait une direction quelconque, ces réactions devraient être remplacées par une force et par un couple.

quant à la composante tangentielle R_t, elle dépend de V et de *i* suivant une loi mal connue; on peut admettre approximativement la formule :

$$(9) \qquad f \frac{\varpi}{g} AV^2 \cos i = R_t$$

f désignant un coefficient très petit devant 2.

La résistance $\overline{CR}$ est d'après cela sensiblement normale au plan Π, sauf pour les petites valeurs de *i* : pour $i = 0$, elle est parallèle au plan π.

Appelons *résistance nuisible ou traînée* F *et résistance utile ou poussée* N les composantes de R suivant $\overline{V}$ et suivant un plan perpendiculaire à $\overline{V}$; la première a toujours le sens opposé à $\overline{V}$. Si $\overline{V}$ est horizontal ainsi que le grand côté du rectangle et si le rectangle est incliné vers le haut de l'arrière à l'avant, la résistance utile N est verticale et ascendante; c'est la *force sustentatrice* de Π considéré comme une aile.

Quand on ne tient pas compte des frottements de l'air sur le plan on a :

$$N = R \cos i, \qquad F = R \sin i, \qquad \text{d'où} \quad F = N \operatorname{tg} i,$$

avec pour $i < \frac{\pi}{6}$

$$R = 2 \frac{\varpi}{g} AV^2 \sin i = 2 \frac{\varpi}{g} AVV_n$$

Si on tient compte des frottements on a :

$$N = R_n \cos i - R_t \sin i, \qquad F = R_n \sin i + R_t \cos i,$$

R_n et R_t étant données par les équations (8) et (9). Pour les petites valeurs de *i*; $N = \frac{\varpi}{g} AV^2 i \, [2 + \ldots]$; $F = \frac{\varpi}{g} AV^2 [f + 2i^2 + \ldots]$, les termes non écrits étant très petits devant les termes écrits. Ces formules restent vraies si le plan est incliné vers le bas, à condition de regarder *i* (et par suite R_n) comme négatif.

RÉSISTANCE DE L'AIR A LA TRANSLATION D'UNE PAROI COURBE. — Considérons une paroi mince cylindrique comprise entre deux sections droites et deux génératrices *ab*, *cd* ; et imaginons qu'une nappe liquide arrive sur le bord antérieur *ab* de la surface immobile, avec une vitesse $\overline{V}$ tangente à la surface et perpendiculaire à *ab* ; $\overline{V}$ est parallèle à *at*, tangente en *a* à la section droite.

Soit *i* l'angle (que nous supposons petit) des deux tangentes en *a* et *c* à cette section.

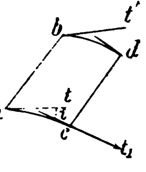


Fig. 34.

Le système tout entier (nappe liquide et paroi) étant immergé dans un fluide à pression constante, on sait que les pressions qui s'exercent sur la paroi ont une résultante $\overline{OR}$ directement opposée à la bissectrice de l'angle *mon* que font les deux tangentes aux extrémités *m*, *n* de la section droite moyenne, et que la valeur absolue de OR est

Fig. 35.

$$2 \frac{\varpi}{g} A_1 V^2 \sin \frac{i}{2} ,$$

A_1 désignant l'aire de la section droite de la nappe liquide à l'arrivée. Si on décompose encore R en une composante utile N perpendiculaire à V et une composante nuisible F directement opposée à V, on a : $\frac{F}{N} = \text{tg} \frac{i}{2}$.

Supposons dans ce qui suit, pour plus de clarté, $\overline{V}$ et *ab* horizontaux :

N est la force sustentatrice. Pour une même valeur de N, la traînée F est *deux fois plus petite* que celle qui existerait si la même nappe liquide *heurtait* un plan incliné, de même aire, dont *ab* serait l'arête d'avant.

Si l'on admet (Euler, Rankine), la possibilité d'assimiler à ce phénomène l'arrivée d'un courant d'air indéfini sur la paroi immobile, toutes les surfaces cylindriques de même aire se vaudraient, que leur courbure fût prononcée à l'avant, ou à l'arrière, ou constante.

En réalité, l'assimilation précédente est tout à fait grossière et critiquable.

Seuls de longs tâtonnements peuvent déterminer la forme optima de la surface portante. Pour une aire portante, une vitesse V et une force sustentatrice N données, cette forme optima est celle qui présentera la résistance minima à l'avancement F ; on pourra définir sa qualité sustentatrice par le quotient $\frac{N}{F}$. Les ailes d'aéroplanes ont sensiblement des profils paraboliques, dont le sommet est à l'avant.

Quant au point C où la résultante $\overline{R}$ perce S, il est à l'avant de S.

Nous admettrons que C et la direction $\overline{CR}$ ne dépendent que de l'inclinaison de S mais point de la grandeur de $\overline{V}$. Quand la surface S, recevant l'air franchement par en dessous, se relève un peu vers le haut, l'observation montre que C recule. Quand elle s'abaisse, C commence par avancer, puis, à partir d'une certaine inclinaison, recule très rapidement (expériences des Wright, de Rateau, d'Eiffel), ce qui s'explique aisément par l'action de l'air sur la partie supérieure du bord antérieur de l'aile; cette action est une force dirigée vers le bas et la règle de composition des forces montre que cette circonstance fait rétrograder C.

Formules empiriques représentant $\overline{R}$. Angle d'attaque. — Pour une certaine inclinaison S_0 de S, N est nul, et cette inclinaison ne devra jamais être dépassée ni même atteinte par les ailes des appareils d'aviation, car N changerait de sens et la force N cesserait d'être sustentatrice, en même temps qu'elle tendrait à faire pivoter davantage vers le bas l'avant de S autour du centre de gravité de S. Dans cette position S, la corde *mn* est inclinée d'un très petit angle ε sur l'horizon[1]; soit *lp* la droite liée invariablement à la courbe *mCn* et qui coïncide alors avec $\overline{R}$; l'angle *lpm* est donc un petit angle donné ε.

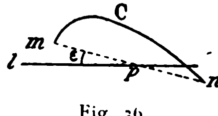


Fig. 36.

1. La droite *pm* peut être dirigée au-dessus (fig. 36) ou au-dessous de *lp* : ε serait négatif dans le second cas.

Désignons par α l'angle (aigu) de $\overline{V}$ et de lp, angle que nous appellerons l'inclinaison de la vitesse sur la surface S ou *angle d'attaque*. Il est essentiel d'observer que cet angle est défini à partir de la direction lp, dont nous venons d'indiquer la détermination expérimentale, et non pas à partir de la corde mn. Soient N et F, comme ci-dessus, les composantes de R normale et parallèle à $\overline{V}$. Pour les surfaces employées en aviation, et, dans les limites restreintes où varie l'angle α, N et F sont assez bien représentées[1] en valeur absolue par les formules suivantes (où α est mesuré en radians) :

$$\text{I} \begin{cases} N = KAV^2\alpha \quad , \\ F = KAV^2 \left[\alpha^2 + f\right] = N\alpha + fKAV^2 \end{cases}$$

K et f désignant deux constantes (la seconde de dimensions nulles) qui dépendent toutes deux de la forme de S. Les formules ont exactement la même forme que si S était un plan Π dont lp serait la section, les frottements n'étant point négligés [p. 198]. Mais si la surface est bien construite, K est au moins une fois et demi plus grand que pour le plan ; dans l'air aux conditions normales, K atteint et dépasse pour les bonnes surfaces usuelles 0,33 au lieu de 0,24 [les unités étant le mètre, le kilogramme-poids et la seconde]. Les valeurs admises pour K par les divers aviateurs atteignent et dépassent 0,4 et 0,5 : les divergences de leurs conclusions proviennent de *l'incertitude de l'angle* α, qui n'est point l'inclinaison de la corde mn. Admettons, par exemple, la valeur :

$$K = 0{,}4 \ ;$$

pour $A = 50$ mètres, $V = 20$ mètres (ou 72 kilomètres à l'heure) et $\alpha = \frac{1}{12}$ ou 5°, N est égal à 666 kilogrammes ; ces nombres correspondent assez bien aux caractéristiques des aéroplanes Voisin.

1. Expériences de Lilienthal interprétées par Soreau. Les formules I s'accordent assez bien avec les expériences pour α variant de zéro à 1/4 rad., c'est-à-dire de 0° à 15°.

Nous n'indiquerons pas d'application numérique faisant intervenir la valeur de f, car cette valeur est très incertaine. On peut d'ailleurs observer que les déductions d'après lesquelles les formules I ont été déduites des expériences de Lilienthal ne sont pas convaincantes. D'une part, en effet, les mesures de Lilienthal prêtent à la critique; d'autre part, il n'a opéré que sur des petites surfaces, inférieures à un mètre carré; il y a donc une extrapolation par similitude très hardie. Quant aux expériences sur les grandes voilures, elles ne peuvent guère être faites qu'en étudiant la marche ordinaire et la chute planée d'un aéroplane (méthode de Ferber): pour interpréter ces mesures, il conviendrait de se donner des formules analogues à (I) dans lesquelles N et F seraient développés *a priori* suivant les puissances de α supposé petit; et il s'agirait tout d'abord de vérifier que les seuls termes importants sont, dans N le terme en α, et dans F le terme constant et le terme en α^2; on calculerait ensuite les coefficients de ces termes. L'essentiel pour nous est d'observer que la substitution de ces formules plus générales aux formules I, n'entraînerait pas de modification importante de la théorie de l'aéroplane.

Remarque. — Il ne faut pas confondre l'angle d'attaque α tel que nous venons le définir avec l'inclinaison α_1 de V sur le bord antérieur de S. Soient mt la tangente en m à mCn et τ_1 l'angle de mt et de lp; on a : $\alpha_1 = \alpha - \tau_1$. Si α est un peu plus petit que τ_1 (de 6°, par exemple), α_1 est négatif et l'avant extrême de S reçoit l'air par en dessus. Ces conditions sont celles de la marche normale d'un aéroplane Voisin.

Courbe métacentrique. — Supposons S immobile, le plan du tableau étant son plan de symétrie, et faisons varier dans ce plan l'inclinaison de l'arrivée de l'air sur S, c'est-à-dire l'angle d'attaque α. Pour chaque valeur[1] de α, la résultante R des résistances occupe une position déterminée et coupe la courbe mCn en un point C déterminé.

1. Si on admet que C varie aussi avec la valeur absolue de V (pour α donné), ce qui suit s'applique à une valeur donnée de V. A chaque valeur de V correspondrait une courbe métacentrique.

sition pour Π_1 : les deux composantes parallèles à $O\zeta$ sont égales et de même sens et admettent une résultante Z dirigée selon $O\zeta$; les deux composantes normales à $O\zeta$ forment un couple d'axe parallèle à $O\zeta$, soit ν cet axe compté positivement selon $O\zeta$.

Appelons An la demi-normale à Π qui fait un angle aigu avec $O\zeta$, et admettons, pour fixer les idées, qu'elle soit orientée de droite à gauche par rapport à $O\zeta$. Soit Am la projection de An sur le plan perpendiculaire en A à CA, φ l'angle de $O\zeta$ et de Am, $\left(0 \leqq \varphi \leqq \frac{\pi}{2}\right)$ et ψ l'angle mAn.

La projection W_n sur An de la vitesse W de l'élément Π est [r désignant la distance CA]:

$$(1) \qquad W_n = (-r\omega \sin \varphi + V \cos \varphi) \cos \psi.$$

La réaction de l'air sur Π a le sens An ou le sens contraire selon que la quantité (1) est négative ou positive[1]. Soit R l'action de l'air sur π et Z la composante de R suivant l'axe de rotation. Pour que la somme géométrique des réactions de l'air sur le système ACB ait le sens de $\overline{V}$, c'est-à-dire soit *propulsive*, il faut et il suffit que Z soit positif, donc que $r\omega$ soit plus grand que V cotg φ; la valeur de Z est alors $2R \cos \psi \cos \varphi$. Quant au couple ν, il s'oppose à la rotation positive ω et son moment en valeur absolue est $2Rr \cos \psi \sin \varphi$. Le rapport $\frac{\nu}{Z} = r \operatorname{tg} \varphi$.

Imaginons que le système ACB soit le propulseur d'un [illegible]lide Σ auquel il est lié invariablement et qui porte un [illegible]teur, ce moteur exerçant sur l'arbre propulseur ABC un [illegible]le dont l'axe a le sens $O\zeta$ et une valeur absolue donnée [illegible] propulseur commence à tourner autour de $O\zeta$ dans [illegible] positif et propulse Σ dans le sens $O\zeta$. Une fois le [illegible]tabli, c'est-à-dire V et ω constants, le théorème

[1] [illegible] négatif, Z sera négatif pour toute valeur de ω. [illegible]ue gauche à droite, il faut renverser les conclu[illegible]e de ω : pour $\omega > 0$, Z est négatif quel que [illegible]ω, il est positif si $r\,|\omega| > N$ cotg φ.

Résistance de l'air a la translation oblique d'une surface cylindrique. — Supposons que la vitesse relative de l'air par rapport à S ne soit plus parallèle au plan de symétrie de S. Les réactions de l'air sur la surface à un instant donné peuvent être remplacées par une force $\overline{CR}$ et un couple dont l'axe OH est parallèle à $\bar{R}$. La droite CD qui porte CR est déterminée sans ambiguité. Pour discuter avec rigueur la stabilité des aéroplanes, il serait indispensable de connaître $\overline{CR}$ et $\overline{CH}$ pour chaque orientation et valeur de $\overline{V}$. Or les expériences sur ce difficile sujet font absolument défaut.

Toutefois, si l'angle de $\overline{V}$ et du plan de symétrie est faible, et si la courbure de S est peu accentuée, on peut *qualitativement* assimiler la surface au plan fictif Π et admettre qu'il existe encore une résultante unique dont le point d'application C se trouve sur la demi-droite $\overline{Ou}$, O désignant le centre de figure du rectangle S et Ou la projection sur S de la vitesse $\overline{V}$ construite avec O comme origine.

En définitive, dans les applications qui vont suivre, nous pourrons remplacer partout les surfaces portantes par les plans fictifs Π qui leur sont invariablement liés.

Propulseurs hélicoïdaux.

Schéma d'un propulseur. — Considérons une tige rigide AB dont le milieu C décrit une droite fixe Oz avec une vitesse V, tandis qu'elle tourne autour de la demi-droite Oz avec une vitesse angulaire positive ω. Les deux extrémités A et B portent deux petites surfaces planes Π et Π_1 symétriques par rapport à Oz. Les réactions de l'air (ou de l'eau) ***immobile*** dans lequel est immergé le système *sont symétriques **par rapport à*** Oz. Décomposons la réaction totale qui s'exerce sur Π en deux composantes parallèle et normale à Oz et effectuons la même décompo-

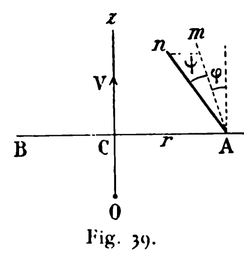


Fig. 39.

sition pour Π_1 : les deux composantes parallèles à $O\zeta$ sont égales et de même sens et admettent une résultante Z dirigée selon $O\zeta$; les deux composantes normales à $O\zeta$ forment un couple d'axe parallèle à $O\zeta$, soit ν cet axe compté positivement selon $O\zeta$.

Appelons An la demi-normale à Π qui fait un angle aigu avec $O\zeta$, et admettons, pour fixer les idées, qu'elle soit orientée de droite à gauche par rapport à $O\zeta$. Soit Am la projection de An sur le plan perpendiculaire en A à CA, φ l'angle de $O\zeta$ et de Am, $\left(O \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}\right)$ et ψ l'angle mAn.

La projection W_n sur An de la vitesse W de l'élément Π est [r désignant la distance CA]:

$$W_n = (-r\omega \sin \varphi + V \cos \varphi) \cos \psi. \tag{1}$$

La réaction de l'air sur Π a le sens An ou le sens contraire selon que la quantité (1) est négative ou positive[1]. Soit R l'action de l'air sur π et Z la composante de R suivant l'axe de rotation. Pour que la somme géométrique des réactions de l'air sur le système ACB ait le sens de $\overline{V}$, c'est-à-dire soit *propulsive*, il faut et il suffit que Z soit positif, donc que $r\omega$ soit plus grand que $V \operatorname{cotg} \varphi$; la valeur de Z est alors $2R \cos \psi \cos \varphi$. Quant au couple ν, il s'oppose à la rotation positive ω et son moment en valeur absolue est $2Rr \cos \psi \sin \varphi$. Le rapport $\frac{\nu}{Z} = r \operatorname{tg} \varphi$.

Imaginons que le système ACB soit le propulseur d'un solide Σ auquel il est lié invariablement et qui porte un moteur, ce moteur exerçant sur l'arbre propulseur ABC un couple dont l'axe a le sens $O\zeta$ et une valeur absolue donnée ν_1 : le propulseur commence à tourner autour de $O\zeta$ dans le sens positif et propulse Σ dans le sens $O\zeta$. Une fois le régime établi, c'est-à-dire V et ω constants, le théorème

1. Si ω est négatif, Z sera négatif pour toute valeur de ω. Si An est orientée de gauche à droite, il faut renverser les conclusions quant au signe de ω : pour $\omega > o$, Z est négatif quel que soit ω; pour $\omega < o$, il est positif si $r\,|\,\omega\,| > N \operatorname{cotg} \varphi$.

des aires et le théorème du mouvement du centre de gravité appliqués au système ABC, et à l'axe $O\zeta$ (supposé horizontal) montrent : 1° que $\nu_1 = \nu = rZ\operatorname{tg}\varphi$; 2° que la force de propulsion [somme géométrique des réactions exercées par le propulseur sur Σ] est égale à Z, c'est-à-dire à $\nu_1 \frac{\operatorname{cotg}\varphi}{r}$. Le travail moteur, pendant l'unité de temps, est : $\nu_1\omega = \omega r Z \operatorname{tg}\varphi$, quantité toujours plus grande que VZ, puisque V reste nécessairement inférieur à $r\omega\operatorname{tg}\varphi$.

En valeur absolue, la vitesse W de Π est $\sqrt{r^2\omega^2 + V^2}$, W_n est donnée par l'expression (1). La loi du sinus exprime que $R = \lambda AWW_n$ (A aire de Π), d'où :

$$(2) \quad \nu_1 = 2\lambda A r \cos^2\psi \sin\varphi \left[\omega r \sin\varphi - V\cos\varphi\right]\sqrt{V^2 + r^2\omega^2}.$$

En général, la force de propulsion doit surmonter une résistance que rencontre Σ et qui croit proportionnellement à V^2 d'où la condition

$$(3) \qquad \mu V^2 = \frac{\nu_1 \operatorname{cotg}\varphi}{r}$$

Le couple ν_1 étant donné, l'équation (3) fait connaître V^2, l'équation (2) donne la valeur de ω, plus grande que $\frac{V\operatorname{cotg}\varphi}{r}$ d'après la forme même du second membre de (2).

L'angle ψ n'intervient que dans l'équation (2). La valeur de ω pour ν_1 donné, et par suite le travail moteur dépensé $\nu_1\omega$, sont d'autant plus grands que $\cos\psi$ est plus petit. Il faut donc choisir ψ nul, c'est-à-dire faire passer le plan Π par CA.

PROPULSEURS HÉLICOIDAUX. — Considérons maintenant une surface de vis à filets carrés d'axe $O\zeta$, que nous supposons dextrorsum, qui tourne autour de $O\zeta$ avec la vitesse angulaire (positive) ω, en même temps qu'elle avance dans le sens $O\zeta$ avec une vitesse V. La surface est limitée par deux génératrices rectilignes, l'axe $O\zeta$ et un cylindre de

révolution d'axe Oz. Soit $z = h\theta$ l'équation de la surface en coordonnées semi-polaires (r, θ, z), dans sa position primitive. Le long d'une génératrice rectiligne D, la demi-normale à la surface qui fait un angle aigu φ avec Oz est orientée de droite à gauche autour de Oz, perpendiculaire à D, et on a : $\operatorname{tg} \varphi = \frac{h}{r}$.

Si on décompose la surface en éléments symétriques, deux à deux par rapport à Oz, et si on applique à ces éléments les résultats précédents, on voit : 1° que les réactions de l'air sur l'hélice équivalent à une force Z dirigée selon Oz et à un couple ν dont l'axe est dirigé selon Oz; 2° que Z a le sens Oz si $h\omega > V$: 3° que $\frac{\nu}{Z} = h$. Le travail $\nu\omega$ du couple moteur appliqué au propulseur est donc égal à $Zh\omega$, donc toujours supérieur à VZ.

Recul de l'hélice. — Si la surface se vissait dans un écrou fixe, elle avancerait de $2\pi h$ (pas de l'hélice) par tour complet; en réalité, $\frac{2\pi}{\omega}$ étant la durée d'un tour complet, elle avance seulement de $V \frac{2\pi}{\omega}$. La différence toujours positive $2\pi \left[h - \frac{V}{\omega}\right]$ ou $2\pi \frac{\rho}{\omega}$ s'appelle recul de l'hélice; ρ est la vitesse de recul. Le travail moteur pendant l'unité de temps est $Zh\omega = Z[V + \rho]$. On donne souvent au rapport $\frac{ZV}{Zh\omega} < 1$ le nom de rendement de l'hélice.

L'équation (3) devient :

$$\mu V^2 = \frac{\nu}{h} . \tag{4}$$

Ces conclusions supposent seulement que la réaction de l'air sur un élément de surface est normale à cet élément, ce qui est assez voisin de la réalité. Il convient de ne pas oublier que dans toute cette discussion, l'air est supposé immobile.

Quand on admet (hypothèse très éloignée de la réalité) que chaque élément de surface subit la même

pression de l'air que s'il était seul, on peut appliquer à chaque élément la formule (2) où on doit faire : $\cos \psi = 1$ et $\operatorname{tg} \varphi = \frac{h}{\rho}$.

Dans la réalité, on évide les parties de l'hélice voisines de l'axe pour ne garder qu'une couronne hélicoïdale comprise entre les cylindres $r = r_0$ et $r = r_1$. Dans le cas où $\frac{V^2}{2r_0^2\omega^2}$ est petit devant l'unité, on peut remplacer approximativement $\sqrt{V^2 + r^2\omega^2}$ par $r\omega$, et le couple des résistances de l'air sur l'hélice a comme moment :

$$\nu = \lambda_1 h\omega\,(h\omega - V) \tag{5}$$

λ_1 étant une constante attachée à l'hélice. Pour h très petit et $\frac{r_1}{r_0}$ voisin de 1, λ_1 est sensiblement égal à $\lambda r_0 A$, A désignant l'aire de la surface hélicoïdale.

Les formules (4) et (5) font connaître ω et V quand ν est donné.

APPLICATION A L'HÉLICOPTÈRE. — GYROPLANS. — Supposons que l'axe $O\zeta$ soit vertical et que le corps Σ soit immobile dans l'air : V est nul, et la force de propulsion de l'hélice est égale au poids de tout l'appareil. Pour h petit et $\frac{r_1}{r_0}$ voisin de 1, on aura approximativement :

$$P = \frac{\nu}{h} = \lambda\, r_0\, A h\, \omega^2 \; ; \tag{6}$$

le travail moteur dépensé sur l'arbre de l'hélice par unité de temps est $Ph\omega = \frac{P^{3/2}h^{1/2}}{\sqrt{\lambda r_0 A}}$.

Pour ω donné, on voit que ce travail peut être rendu aussi petit qu'on veut en prenant h petit et $r_0 A$ grand.

De là l'idée d'accroître considérablement les surfaces des hélices destinées aux hélicoptères, et de transformer en quelque sorte toute la surface de l'hélicoptère en hélice (gyroplans).

Mais à ces conclusions toutes théoriques s'opposent la difficulté d'accroître indéfiniment les dimensions d'une hélice de poids donné, et tous les éléments qu'a négligés le calcul [frottements, etc].

Hélice de pas variable. — Dans le propulseur que nous venons d'étudier, l'air ne frappe pas la surface tangentiellement; il se produit donc un choc, d'où une perte de force vive.

On améliorera beaucoup le fonctionnement de l'hélice en supprimant ou atténuant le choc[1].

Si les vitesses de régime doivent être V et ω, on recevra l'air sur une surface de vis comprise entre deux génératrices très voisines et dont le pas sera $\frac{V}{\omega}$, cette surface sera prolongée par une autre surface analogue de pas plus grand, prolongée elle-même par une troisième de pas plus grand.

On peut perfectionner les théories précédentes en tenant compte des frottements de l'air sur l'hélice (Drzewiecki, Rateau]. Les calculs ainsi conduits ont l'avantage d'introduire un nouveau coefficient arbitraire, qui permet d'établir une certaine corrélation entre les formules obtenues et la réalité. Mais il faut se garder de donner à ces résultats plus de portée qu'à des formules empiriques fort inexactes. Les frottements introduits sont en effet plus faibles que l'erreur commise en appliquant la loi du sinus à chaque élément considéré comme s'il était seul.

En réalité, la détermination précise de la forme et des dimensions des hélices propulsives ne relève actuellement que de l'expérience (voir ch. II).

1. Les raisons sont les mêmes que pour la substitution des ailes courbes au plan incliné [p. 199].

Application des lois de la résistance de l'air à l'aéroplane.

PROBLÈME DE LA CHUTE PLANÉE. — Un corps plan, abandonné en air calme dans des conditions initiales convenables, peut-il descendre d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme ? S'il en est ainsi, les résistances de l'air doivent admettre une résultante égale et directement opposée au poids $\overline{GQ}$ du corps, G désignant le centre de gravité.

Discutons cette condition dans le cas où le corps est un rectangle Π dont le centre de gravité est sur la parallèle DE aux petits côtés menée par le centre de figure D. Nous supposons le corps animé d'une translation initiale nulle ou perpendiculaire au grand côté. Le plan vertical fixe xOy qui contient la position primitive de DE est évidemment un plan de symétrie du phénomène : le point G et la droite DE vont se mouvoir dans ce plan. L'hypothèse que nous étudierons est que la droite DE se meut parallèlement à elle-même avec une vitesse constante $\overline{V}$.

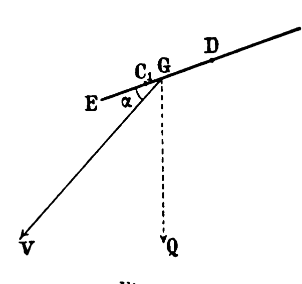


Fig. 40.

Admettons d'abord que les résistances de l'air soient rigoureusement normales au plan Π : pour que ces résistances admettent comme résultante — $\overline{GQ}$, il faut : 1° que le centre de pression C coïncide avec G ; 2° que DE soit horizontal ; 3° que l'angle α de $\overline{V}$ et du plan satisfasse à la condition :

$$(1) \qquad \lambda V^2 \sin\alpha = P \quad ,$$

P désignant le poids du corps et λ une certaine constante attachée au plan[1]. La composante verticale $V \sin\alpha$ de la vitesse est égale à $\sqrt{\frac{P}{\lambda}\sin\alpha}$.

1. Nous supposons $\alpha < 30°$; $\lambda = 0{,}25$ A dans l'air aux conditions normales (A désignant l'aire de Π), si Π est un rectangle allongé.

Or à chaque valeur de α correspond une position C du centre de pression comprise entre D et C_1, C_1 désignant un point situé entre E et D à une distance $EC_1 = \frac{2}{5}$ ED environ. Pour que la chute planée soit possible, il faut donc que G soit compris entre D et C_1. A une telle position de G correspond une valeur de α et une seule telle que C soit en G. La valeur de V^2 est alors déterminée par l'équation (1).

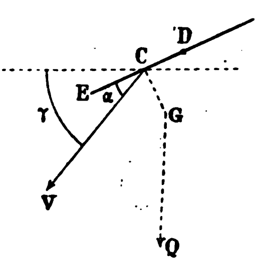


Fig. 41.

Donc, à toute position de G entre D et C_1 correspond un régime de chute planée et un seul. Plus G sera voisin de C_1, plus la pente de chute sera faible, plus V sera grand et plus la vitesse verticale sera faible.

Imaginons maintenant qu'au plan Π soit lié invariablement un solide Σ ayant la forme d'une sphère, dont le centre est dans le plan xOy et sensiblement confondu avec le centre de gravité G de tout le système. Les résistances de l'air sur une sphère ont une résultante $\overline{F}$ ou μV^2, directement opposée à la vitesse $\overline{V}$ et passant par G[1]; les résistances de l'air sur le plan Π ont une résultante $\overline{R}$ normale à Π et appliquée en un certain point C. Pour que les forces $\overline{F}$ et $\overline{R}$ admettent comme résultante — $\overline{GQ}$ poids total du système, il faut d'abord que $\overline{R}$ passe par $\overline{G}$, c'est-à-dire que G soit sur la perpendiculaire à Π menée par C.

Soit maintenant γ l'angle de $\overline{V}$ et du plan horizontal (pente de la chute) et α l'angle de $\overline{V}$ et du plan Π (angle d'attaque); on doit avoir (en projetant sur la direction $\overline{V}$ et la direction perpendiculaire) :

$$(2) \qquad \begin{cases} P \cos \gamma = \lambda V^2 \sin \alpha \cos \alpha \\ P \sin \gamma = V^2 \left[\lambda \sin^2 \alpha + \mu\right] \end{cases},$$

1. μ est un certain coefficient attaché au solide.

d'où sensiblement

$$\text{(3)} \qquad \operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \alpha + \frac{\mu}{\lambda} \operatorname{cotg} \alpha \quad .$$

Pour que la chute planée soit possible, il faut donc et il suffit que la perpendiculaire abaissée de G sur le plan Π tombe en un point C situé en O et C_1. Cette condition remplie, la position de C définit l'angle d'attaque α ; l'angle de chute γ est alors donné par (3) et V par la première condition (2).

Discussion. — Le plan Π et le solide Σ sont supposés donnés, mais on peut attacher Σ à Π dans une position relative arbitraire, de façon que la projection de G sur Π tombe en un point donné C de DE. Comment choisir ce point C pour que la pente de chute soit minima ?

La position de C détermine α. Le problème revient donc à choisir α, de façon que $\operatorname{tg} \gamma$ soit minimum. Il faut pour cela, et il suffit, d'après (3) que :

$$\lambda \operatorname{tg} \alpha = \mu \operatorname{cotg} \alpha \quad ,$$

ou $\operatorname{tg}\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$, et la valeur minima de $\operatorname{tg}\gamma$ est $2\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$.

Dans les applications, $\frac{\mu}{\lambda}$ est petit, les valeurs précédentes de α et γ sont elles-mêmes petites : la résistance du plan sustentateur à l'avancement ou $\lambda V^2 \sin^2\alpha$ est alors sensiblement égale à $\lambda V^2 \alpha^2$ ou μV^2, c'est-à-dire égale à la résistance propre de l'esquif.

Comment choisir G pour que la vitesse verticale soit minima ? Il faut que $V \sin \gamma$ soit minimum. Pour α et γ petits, on a sensiblement :

$$P = \lambda V^2 \alpha$$

$$\gamma = \alpha + \frac{\mu}{\lambda} \frac{1}{\alpha} \quad ,$$

d'où

$$V = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{\alpha\lambda}} \quad , \quad \text{et} \quad V \sin \gamma = V\gamma = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{\lambda}} \left[\sqrt{\alpha} + \frac{\mu}{\lambda \alpha^{3/2}}\right] ;$$

la dérivée par rapport à α de cette dernière expression s'annule pour $\alpha^2 = 3 \frac{\mu}{\lambda}$, ou encore $\alpha = \frac{3\mu}{\lambda\alpha}$. La valeur correspondante de $V\gamma$ est alors minima et égale à $\frac{4}{3} \sqrt{P} \left(\frac{3\mu}{\lambda^3}\right)^{1/4}$. La résistance du plan sustentateur à l'avancement est alors triple de la résistance propre de l'esquif.

Ces deux théorèmes sont dus à Pénaud (1873).

Stabilité contre le tangage (ou longitudinale). — Le régime de la chute planée étant établi, imaginons qu'on change brusquement l'inclinaison de CE d'un petit angle, de façon que α soit un peu augmenté. Le centre de pressions recule en C' sur DE et dans la nouvelle position C'E' de CE, la résultante des réactions de l'air sur Π est C'R' au lieu de CR_1. Le théorème des aires appliqué au mouvement du système autour de son centre de gravité G montre aussitôt [fig. 34] que C'E' revient vers CE. Un raisonnement analogue s'applique si α diminue. Remarquons que cette conclusion est vraie, quelle que soit la position de G sur la perpendiculaire en C à DE, que G soit très en dessus ou très en dessous de C. Le couple de rappel ne dépend en effet que de la distance CC' [et de R'].

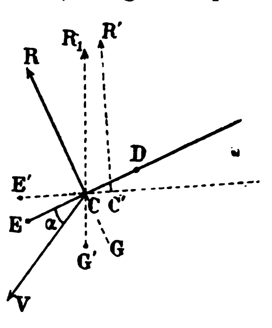


Fig. 42.

Or, c'est là une conclusion contraire à l'opinion universelle des aviateurs, d'après laquelle la stabilité contre le tangage n'existe que si le centre de gravité est au-dessous [1]

1. Certains aviateurs pensent expliquer le fait ainsi : le système est comparable à un pendule accroché par un clou qui serait le centre de pressions : or il est bien connu qu'un tel pendule n'est stable que si son centre de gravité est au-dessous du clou. — Ce raisonnement est sûrement inexact, puisqu'il est en contradiction

de C. Mais dans la théorie précédente, nous avons négligé la composante de $\overline{R}$ parallèle au plan Π [p. 198]. Si nous en tenons compte, notre conclusion va être conforme à l'expérience.

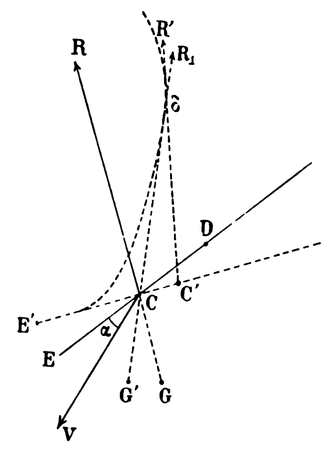


Fig. 43.

Pendant la chute planée, $\overline{R}$ passe par G. Si on augmente un peu α, dans la nouvelle position CE', $\overline{R}$ (au lieu de CR_1) devient $\overline{C'R'}$ [fig. 44], qui coupe $\overline{CR_1}$ en un point ζ (métacentre) situé au-dessus de Π. La force $\overline{R'}$ tend à diminuer l'inclinaison de CE ou à l'accroître suivant que G est au-dessous ou au-dessus de γ. D'où la conclusion : pour que le planeur soit stable au tangage, il faut que le centre de gravité G soit au-dessous du métacentre [1].

Pour les petites valeurs de α, la courbe métacentrique [p. 202] est une courbe tangente à DE et qui s'en écarte fort peu : la règle coïncide alors sensiblement avec la règle pratique qui veut que G soit au-dessous de C.

Conditions générales du planement. — Corrigeons les équations (1) en tenant compte de la composante de $\overline{R}$ parallèle au plan Π, mais en nous bornant à l'étude des petites valeurs de α et γ. Si $f\lambda V^2$ est la valeur absolue de cette composante, il nous faut introduire les termes $-f\lambda V^2 \sin \alpha$,

complète avec le résultat précédent. En réalité, il n'y a aucune identité entre les deux phénomènes qu'on assimile ainsi arbitrairement, et ce sont des raisons toutes différentes, comme il ressort de ce qui suit, qui justifient la règle empirique.

1. Ce théorème est analogue au théorème classique sur l'équilibre du navire.

$+f\lambda V^2 \cos \alpha$ dans les seconds membres de (1); la première équation (1) devient pour α et γ petits :

$$P = \lambda V^2 \alpha \, (1 - f) \quad ,$$

mais, f étant très petit devant l'unité, on peut le négliger, et les équations qui se substituent aux équations (2) deviennent en définitive :

$$(4) \qquad P = \lambda V^2 \alpha \quad , \qquad P\gamma = \lambda V^2 \alpha^2 + (\mu + \lambda f) V^2 \quad ,$$

équations tout à fait analogues aux équations (2) pour α et γ petits, à cela près que la constante μ est remplacée par la constante $\mu + \lambda f$.

D'autre part, $\overline{CR}$ doit passer par G; or pour chaque valeur de α, la distance DC est bien déterminée, soit $DC = \varphi(\alpha)$. Il faut que la droite qui joint C à G soit $\overline{CR}$, c'est-à-dire que $\operatorname{tg} ECG = \frac{\alpha}{f}$ d'où une condition qui définit α (sous la réserve que G soit dans la région du plan CEG balayée par la tangente à la courbe métacentrique).

Supposons maintenant que les deux petits côtés du rectangle Π soit légèrement incurvés : autrement dit, ce sont deux courbes planes parallèles, normales au grand côté de Π, et le plan Π est remplacé par un cylindre de génératrices parallèles au grand côté de π. Nous savons [p. 203] qu'on peut, dans tous les calculs, substituer à cette surface un plan fictif qui lui est invariablement lié : si nous appelons α l'angle de ce plan fictif et de $\overline{V}$, les équations (14) subsistent. Pour simplifier la notation, je remplacerai dans ce qui suit la constante $(\mu + f\lambda)$ par μ, et les conditions du planement seront :

$$(5) \qquad P = \lambda V^2 \alpha \qquad P\gamma = \lambda V^2 \alpha^2 + \mu V^2 \quad .$$

La position de G dans le planeur déterminera α.

En définitive[1], pour que le système constitue un planeur

1. Des conclusions tout à fait analogues s'appliquent à un planeur de forme entièrement quelconque symétrique par rapport au plan xOy.

correspondant à une valeur donnée de α, il faut que son centre de gravité soit sur la tangente à la courbe métacentrique au métacentre δ qui correspond à cette valeur α. Pour que le planeur soit stable contre le tangage, il faut que G soit au-dessous de δ. La pente γ et la vitesse V de la chute planée seront alors données par les équations (5).

Les conclusions de la page 212 quant à la pente minima et la vitesse verticale minima subsistent sans modifications.

MOUVEMENTS PEU DIFFÉRENTS D'UNE DESCENTE CORRECTE. — Les conditions initiales du planeur étant encore symétriques par rapport au plan vertical (plan du tableau), mais d'ailleurs quelconques, G décrira dans ce plan une trajectoire curviligne en général et DE ne gardera pas une direction constante dans ce plan.

Appelons θ l'angle de ED avec l'horizontale Dx_1, $\overline{V}$ la vitesse de G, α l'angle EDV, et γ l'angle x_1 DV, Tous ces angles sont aigus et positifs dans le cas de la figure 44, θ croît quand l'appareil pique du nez vers le sol ; γ est égal à $\alpha + \theta$.

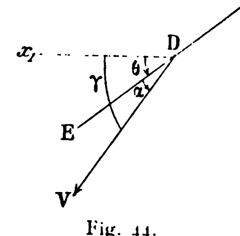


Fig. 44.

Les résistances de l'air sur tout l'appareil admettent une résultante : soient F et N ses projections sur la demi-droite $\overline{V}$ et la perpendiculaire à $\overline{V}$ menée vers le haut, et soit ν son moment par rapport à G compté positivement dans le sens des θ croissants. Quand θ' est nul, on a (pour α petit)

$$F = -V^2 \left[\lambda \alpha^2 + \mu\right] \quad , \qquad N = \lambda V^2 \alpha \quad ,$$

et

$$\nu = \sigma V^2 (\alpha - \alpha_1) \quad ,$$

α_1 désignant la valeur de α qui correspond au planement correct, et σ une constante. Si $\theta' \neq 0$, le raisonnement de la page 19 montre que ν s'accroît d'une quantité $-2\,h\,V\theta'$, h désignant une certaine constante qui dépend de la position

de G par rapport au plan sustentateur Π. D'autre part, pour $\theta' > 0$, les réactions normales de l'air sur les éléments de plan Π sont accrues ou diminuées suivant que ces éléments sont en avant ou en arrière du plan perpendiculaire DE mené par G; la quantité $\lambda V^2 \alpha$ est en définitive accrue une quantité $\lambda_1 V\theta'$, où le coefficient λ_1 est petit et que us négligeons.

Soient maintenant M la masse totale du planeur, I son oment d'inertie autour de $G\zeta_1$ perpendiculaire au plan tableau. Les équations intrinsèques du mouvement de sont, en se limitant aux mouvements pendant lesquels et γ restent petits :

$$(6) \quad \begin{cases} M \dfrac{dV}{dt} = - V^2 \left[\lambda \alpha^2 + \mu\right] + P\gamma \\ MV \dfrac{d\gamma}{dt} = - \lambda V^2 \alpha + P \end{cases} .$$

Le théorème des aires appliqué au mouvement autour de G donne :

$$(7) \quad I\theta'' = \sigma V^2 (\alpha - \alpha_1) - 2hV\theta' , \qquad \text{avec } \gamma = \alpha + \theta .$$

ÉTUDE PRÉCISE DE LA STABILITÉ LONGITUDINALE. — Soient V_1 et γ_1 les valeurs de V et γ qui correspondent au planement correct. Considérons des conditions initiales très voisines de celles de ce planement : posons $V = V_1 + u$, $\alpha = \alpha_1 + \varepsilon, \gamma = \gamma_1 + \eta, \theta = \theta_1 + \tau$; pour étudier le mouvement pendant la période où ε, η et τ sont petits, on est conduit à un système d'équations linéaires et homogènes à coefficients constants. Si on cherche les solutions de la forme : $u = Ae^{rt}$, $\eta = Be^{rt}$, $\tau = Ce^{rt}$, les valeurs de r sont données par une certaine équation algébrique du 4e degré. Pour que le planement correct soit stable, il faut que les racines r de cette équation aient leur partie réelle négative ou nulle, et que les racines purement imaginaires soient simples. On est ainsi ramené à des conditions purement algébriques, qu'ont discutées Bryan et le capitaine Ferber[1]. Quand

1. Les mouvements qui présentent des écarts quelconques par rapport au planement correct ont été considérés par Brillouin. (*Revue de mécanique*, 1909.)

l'équation caractéristique a des racines réelles et négatives, les oscillations du planeur sont apériodiques amorties; quand les racines sont complexes avec partie réelle négative, elles sont périodiques amorties; dans les autres cas, les oscillations ne sont pas amorties.

Équilibre de l'aéroplane.

SCHÉMA DE L'AÉROPLANE OU PLANEUR PROPULSÉ. — Considérons un planeur constitué schématiquement par un plan rectangulaire Π et une sphère Σ invariablement liés [p. 211] : l'appareil est propulsé par une hélice d'arrière dont l'axe invariablement lié au solide (Π, Σ) *passe par le centre de gravité* G de tout le système, et est perpendiculaire au grand côté *ab* du rectangle Π. Le point G est sensiblement confondu avec le centre de Σ. Le plan *xOy* perpendiculaire à *ab* mené par G est un plan de symétrie de l'appareil, l'hélice exceptée. Quand l'axe HG de l'hélice est horizontal, le plan Π est incliné vers le haut de l'arrière à l'avant; l'angle de Π et de HG est un angle invariable que je représente par *i*.

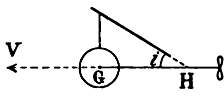


Fig. 45.

Supposons le système animé dans l'air calme d'une translation dont la vitesse est perpendiculaire à *ab*. L'orientation du corps autour de G étant invariable, les réactions de l'air sur le système doivent admettre une résultante passant par G. Or, ces réactions sont :

1° Les réactions sur le plan Π dont la résultante est une certaine force $\overline{R}$; 2° les réactions sur Σ dont la résultante passe par G; 3° les réactions sur l'hélice. Ces dernières équivalent[1] à une force de propulsion $\overline{\Phi}$ dirigée selon l'axe GH de l'hélice et à un couple Γ dont l'axe est également dirigé selon GH, si V est parallèle à GH ou fait un petit angle avec lui.

D'après cela, l'orientation du système ne pourrait rester

1. Nous supposons que l'hélice travaille dans un air qui est calme après le passage de Π et de Σ.

invariable, car le moment de $\overline{R}$ par rapport à G normal à GH ne peut détruire Γ. Mais si nous remplaçons l'hélice unique par deux hélices rigoureusement symétriques par rapport au plan xOy et tournant par suite à même vitesse en sens inverse, les deux forces de propulsion Φ_1 et Φ_2 s'ajoutent, les deux couples Γ_1 et Γ_2 se détruisent. Les axes des hélices sont parallèles à GH et situés dans le plan horizontal de G. Leurs réactions sur l'appareil équivalent à une force unique dirigée selon HG. Dans ce cas, $\overline{R}$ doit passer par G pour que le système conserve la même orientation. C'est cet appareil que nous supposerons réalisé dans ce qui suit[1].

Gouverne d'un aéroplane. — Nous admettons que le pilote est capable de modifier à son gré (au moins dans de certaines limites) le moment par rapport à G des réactions de l'air, cela sans modifier sensiblement leur somme géométrique. C'est ce qu'on peut réaliser, par exemple, à l'aide de gouvernails et d'ailerons. Pour les décrire, supposons l'appareil placé dans une position où l'axe GH est horizontal ainsi que le grand côté ab du plan sustentateur : imaginons qu'on adjoigne à l'arrière (ou à l'avant) de l'appareil : 1° un petit plan mobile autour d'un axe vertical du plan de symétrie (*gouvernail vertical*) ; 2° un petit plan mobile autour d'une parallèle à ab (*gouvernail horizontal*).

Le premier plan est symétrique par rapport au plan horizontal de G ; le second est symétrique par rapport au plan de symétrie xOy. Enfin complétons l'appareil par deux petits plans horizontaux (*ailerons*) symétriques par rapport au plan xOy et mobiles en sens inverse autour de Gz_1. On voit immédiatement que le maniement du premier gouvernail ajoute au moment $\overline{GR}$ (par rapport à G) des

1. Supposons que le système à hélice unique soit animé d'une translation horizontale uniforme et que $\overline{R}$ passe par G. Pour détruire le couple Γ, il suffit d'ajouter un poids supplémentaire m situé sur la perpendiculaire Gz_1 en G au plan xOy à une distance et d'un côté convenables ; en effet, ce poids, étant lié invariablement au système animé d'un mouvement rectiligne uniforme, exerce sur lui une réaction égale à son poids, réaction dont le moment est égal en grandeur et sens à Γ pour une position convenable de m.

réactions de l'air un vecteur de direction verticale, sans modifier très sensiblement[1] leur somme géométrique [la surface du gouvernail étant supposée petite]; en un mot, le maniement du gouvernail vertical équivaut à faire agir sur l'appareil un couple horizontal, dont le sens dépend du sens dans lequel on tourne le gouvernail. Le maniement du gouvernail horizontal introduit de même un couple situé dans le plan xOy, et le maniement des ailerons un couple situé dans le plan y_1Gz_1 perpendiculaire en G à GH.

Au lieu d'ailerons, si on emploie le gauchissement des ailes, ce gauchissement introduit un couple dont le plan n'est pas en général le plan y_1Gz_1 : si on veut exercer un couple orienté dans ce dernier plan, il faudra corriger l'effet du gauchissement à l'aide des deux autres gouvernes.

Enfin, il est loisible de remplacer le gouvernail horizontal et les ailerons par la manœuvre d'un poids qu'on déplace suivant GH ou suivant Gz_1 ou suivant une direction intermédiaire (voir la note de la page 219).

Quel que soit le procédé de manœuvre adopté, le pilote est ainsi capable d'exercer sur l'appareil un couple arbitraire. D'où la possibilité d'imposer au mouvement trois conditions *ad libitum*, par exemple de maintenir l'appareil dans une orientation arbitraire (du moins entre certaines limites).

MARCHE NORMALE D'UN AÉROPLANE. — La marche normale qu'on cherche à assurer aux aéroplanes actuels est une marche dans laquelle l'appareil est animé d'une translation horizontale uniforme, parallèle à son axe de propulsion GH, son plan de symétrie étant vertical. Dans une telle position, l'angle d'attaque α se confond avec l'angle donné de GH et du plan sustentateur fictif (que nous appellerons *plan de la voilure*).

Dans cette position, la résultante $\overline{CR}$ des réactions de l'air sur la voilure doit passer par G : autrement dit, il faut que G soit sur la direction CR qui correspond à l'angle

[1] On rendrait cette modification tout à fait négligeable en doublant chaque gouvernail vertical et horizontal par un gouvernail symétrique par rapport au plan y_1Gz_1 normal en G à GH.

d'attaque i de la voilure. Le raisonnement de la page 214 montre que, pour la stabilité, G doit être au-dessous du métacentre δ correspondant à C, c'est-à-dire en fait au-dessous du plan de voilure.

D'autre part, le mouvement de G étant rectiligne et uniforme, on a :

$$(1) \quad \begin{cases} P = \lambda V^2 i \;, \\ \Phi = P\left(\lambda i^2 + \mu\right) V^2 \cdot \end{cases}$$

P désignant toujours le poids total de l'appareil et Φ la force de propulsion totale des deux hélices. Ces équations sont les mêmes que si la voilure était un plan parfaitement lisse, l'esquif rencontrant la résistance à l'avancement μV^2; la force $\lambda V^2 i^2 = Pi$ serait alors la résistance propre de la voilure.

Les équations (1) entraînent :

$$(2) \qquad \Phi = P\left[i + \frac{\mu}{\lambda i}\right] \cdot$$

D'autre part, le couple ν exercé par le moteur sur les arbres des deux hélices est donné [p. 178], donc Φ, [p. 206], et si ω est la vitesse de rotation des hélices, ω vérifie une certaine relation[1]:

$$(3) \qquad \nu = \psi\,(\omega, V)$$

qui dépend des propulseurs adoptés. La valeur de $\nu\omega$ définie par (3) est toujours supérieure à ΦV.

D'après cela, supposons donnés le poids P de tout l'appareil, le couple moteur ν et la vitesse maxima ω_1 de fonctionnement du moteur, enfin les constantes λ et μ; Φ est alors donné. Pour que l'appareil puisse voler, dans les conditions dites normales, il faut :

1° que l'équation (2) en i soit satisfaite; 2° que l'équa-

1. Par exemple, la relation : $\nu = \sigma\,(h\omega - V)\,h\omega$, si chaque propulseur est une hélice de pas $2\pi h$, σ désignant une constante ; Φ est égal à $\frac{\nu}{h}$.

tion (3) en ω, où on remplace V par $\frac{P}{\sqrt{\lambda i}}$ ait une racine plus petite que ω_1.

La force de propulsion Φ est minima d'après (2) quand $i = \frac{\mu}{\lambda i}$, c'est-à-dire quand la résistance propre P*i* de la voilure est égale à celle de l'esquif : Φ est alors égal à $2\,P\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$.

Quant au travail, (par unité de temps) des résistances à l'avancement, à savoir ΦV, il est donné par :

$$\Phi V = \frac{P}{\sqrt{\lambda}}\left[\sqrt{i} + \frac{\mu}{\lambda i^{3/2}}\right].$$

Le calcul de la page 212 montre aussitôt que ce travail est minimum quand la résistance propre de la voilure P*i* est triple de l'esquif.

AUTRES RÉGIMES DE L'AÉROPLANE. — Dans la pratique, Φ et *i* sont mal connus et il est difficile de réaliser exactement la condition (2). Cette condition nécessaire n'étant pas remplie, un autre régime est-il possible dans lequel le centre de gravité décrit encore uniformément une droite horizontale, la direction GH n'étant plus horizontale mais restant invariable ?

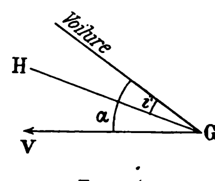


Fig. 46.

Soit α l'angle d'attaque ($\alpha >$ ou $< i$). Les équations (1) sont remplacées par les suivantes :

$$(4) \qquad \begin{cases} P = \lambda V \sin^2 \alpha + \Phi \sin(\alpha - i) \\ \Phi \cos(\alpha - i) = \lambda V^2 \sin^2 \alpha + \mu V^2 \end{cases},$$

qui coïncident avec les équations (1) pour α égal au petit angle *i*. Si on pose $\beta = \alpha - i$, ces équations entraînent l'équation suivante analogue à (2) :

$$(5) \qquad \frac{\Phi \cos \beta}{P - \Phi \sin \beta} = \operatorname{tg} \alpha + \frac{\mu}{\lambda} \operatorname{cotg} \alpha$$

P, λ et μ étant donnés, le minimum de Φ a lieu pour :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\mu}{\lambda} \operatorname{cotg} \alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} \beta = 2\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \ ;$$

$\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$ étant petit dans les applications, ces valeurs donnent sensiblement

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \ , \qquad \beta = 2\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} = 2\alpha \ ,$$

d'où $\alpha - i = 2\alpha$, $i = -\alpha$. Ces conditions exigent que GH soit au-dessus de la voilure et que celle-ci soit bissectrice de l'angle HGV. Autrement dit, soit α_0 l'angle d'attaque qui correspond à la pente minimum de la chute planée de l'appareil (moteur éteint) : la poussée qu'exige l'aéroplane propulsé pour se soutenir horizontalement est minima quand l'angle d'attaque est égal à α_0 et quand l'axe GH de poussée est dirigé au-dessus du plan de voilure et fait avec ce plan un angle égal à α_0[1].

La valeur minima de Φ est égale à $\dfrac{2P\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}}{1 + \frac{2\mu}{\lambda}}$, au lieu de la valeur $2P\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$ trouvée dans le cas de $\beta = 0$. Mais $\frac{2\mu}{\lambda}$ étant petit dans la réalité, ce gain sur Φ est peu appréciable. Des remarques analogues s'appliquent au travail de la poussée. D'autre part, les hélices, dont l'axe est oblique

1. Ces conclusions ne sont vraies qu'autant que les formules admises pour représenter les résistances de l'air sur la voilure et sur l'esquif sont exactes.

De plus, les formules (1) supposent l'angle de $\overline{V}$ et GH assez petit pour que l'effet des hélices soit à peu près le même que si $\overline{V}$ avait le sens GH ; cette condition sera très sensiblement remplie si $R\omega$ est grand devant V, [R rayon de l'hélice].

par rapport à $\overline{V}$, travaillent moins bien. C'est pourquoi le régime dans lequel GH a le sens de V est préférable.

D'où cette conclusion :

Pour que l'appareil puisse se soutenir horizontalement il faut que le moteur [de poids nécessairement inférieur à P] ait une puissance maxima au moins égale à $\frac{3}{4}\frac{P^{\frac{3}{2}}}{\lambda^{\frac{3}{4}}}\left(3\mu\right)^{\frac{1}{4}}$ et qu'il soit capable de communiquer aux hélices une force de propulsion au moins égale à $2P\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$. Ces conditions ne sont d'ailleurs pas suffisantes.

Supposons $\Phi > 2P\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$; l'angle d'attaque α qui correspond à la translation horizontale est donné par l'équation (5), où $\beta = \alpha - i$; dans les applications $\Phi\beta$ est très petit devant P, α est petit, et on peut réduire approximativement cette équation à la suivante.

$$\Phi = P\left(\alpha + \frac{\mu}{\lambda\alpha}\right) \tag{6}$$

Cette équation a deux racines en α, toutes deux positives, l'une plus petite que $\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$, l'autre plus grande. A ces deux racines α_1, α_2 $(\alpha_1 < \alpha_2)$ correspondent deux vitesses V_1 et V_2 de marche horizontale $(V_1 > V_2)$, ces deux racines se confondent, quand $\Phi = 2P\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$.

Imaginons qu'on accroisse P, c'est-à-dire qu'on ajoute un poids supplémentaire au centre de gravité de l'appareil; on voit aussitôt que la racine α_1 croit, V_1 décroît[1] ; au contraire α_2 décroît, V_2 croît. Si donc le second régime se trouvait réalisé, l'augmentation du poids de l'appareil (ou une diminution de la poussée) entraînerait une vitesse plus grande et un angle d'attaque plus faible; mais nous allons voir que ce second régime est instable et par suite ne s'établira pas.

1. La même chose a lieu si Φ décroît.

ÉTABLISSEMENT ET STABILITÉ DU RÉGIME. — Imaginons que le pilote gouverne de manière à conserver la même hauteur au-dessus du sol; on a, dans ce cas, à chaque instant :

$$P = \lambda V^2 \alpha + \Phi (\alpha - i) \quad ,$$

ou très sensiblement [p. 224] :

$$(7) \qquad P = \lambda V^2 \alpha \quad .$$

D'autre part, V satisfait à l'équation

$$(8) \qquad M \frac{dV}{dt} = \Phi - \lambda V^2 \alpha^2 - \mu V^2 \quad ;$$

si on tire α de l'équation (7), il vient

$$(9) \qquad M \frac{dV}{dt} = \Phi - \frac{P^2}{\lambda V^2} - \mu V^2$$

ou encore :

$$(10) \quad M \frac{dV}{dt} = \frac{\mu}{V^2} \left[V_1^2 - V^2 \right] \left[V^2 - V_2^2 \right] \ , \quad (V_1 > V_2).$$

Si V est initialement égal à V_1 ou V_2, V reste constant ainsi que α : c'est le régime étudié dans le numéro précédent.

Si $V > V_1$, V décroît et tend vers V_1 pour $t = \infty$: si $V_2 < V < V_1$, V croît et tend vers V_1 pour $t = \infty$. Si $V < V_2$, V décroît, et α croît. On voit donc que le régime qui s'établira sensiblement au bout d'un certain temps (très court en fait), c'est le régime : $V = V_1$, $\alpha = \alpha_1$, cela sous la seule réserve que V soit initialement $> V_2$.

L'aviateur devra donc rouler sur le sol jusqu'à ce que sa vitesse V dépasse franchement V_2; à l'aide du gouvernail d'avant, il donnera (pour s'élever) à l'appareil une inclinaison α supérieure à $\frac{P}{\lambda V^2}$; en manœuvrant convenablement, il se maintiendra ensuite à hauteur constante, et le régime qui s'établira sera le régime α_1, V_1.

Si Φ diminue un peu, c'est-à dire si le moteur faiblit, l'angle d'attaque s'accroît un peu et V diminue. Il en va de même, si on ajoute un poids à l'appareil.

Pour que, dans le régime α_1, V_1, l'axe GH soit horizontal, il faut et il suffit que $\alpha_1 = i$. L'appareil doit donc être construit de façon que (en ordre de marche) i soit *la plus petite racine* de l'équation :

$$\Phi = P\left[i + \frac{\mu}{\lambda i}\right].$$

Cette condition remplie, quand l'aviateur se meut horizontalement, l'axe de propulsion est horizontal. Si on augmente un peu le poids P de l'appareil, [ou si Φ diminue], cet axe pointe vers le haut et V diminue ; si on diminue un peu P (ou si Φ augmente), cet axe pointe un peu vers le sol et V augmente.

Remarque I. — Plaçons-nous dans le cas idéal où la voilure serait un plan parfaitement lisse et où l'esquif serait assez effilé pour offrir une résistance nulle. On doit faire alors $\mu = 0$ dans les équations précédentes : α_1 est nul et V_1 est infini. L'équation (10) devient :

$$M\frac{dV}{dt} = \frac{\Phi}{V^2}(V^2 - V_2^2)\ , \qquad \left[V_2 = \frac{P}{\sqrt{\lambda\Phi}}\right]$$

Le seul régime *possible* est $V = V_2$, $\alpha = \alpha_2$, mais ce régime (instable) ne s'établira jamais : si initialement V est plus grand que V_2, V croîtra indéfiniment et α tendra vers zéro, cela si faible que soit le moteur; si $V < V_2$, V décroîtra et α croîtra. C'est donc l'existence des résistances de l'esquif et des frottements de l'air sur la voilure qui permet au régime de s'établir.

Remarque II. — Il faut que Φ dépasse $2P\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$. Mais il importe que Φ ne soit pas trop grand : en effet, si Φ est très grand, α_1 est très petit et V_1 très grand; la moindre variation de α entraîne ou une brusque ascension de l'appareil (quand α est un peu trop grand), ou une brusque descente (quand α est un peu trop petit), descente qui deviendra une chute véritable si une fausse manœuvre rend α négatif.

En outre, le couple engendré par une même manœuvre du gouvernail d'avant est proportionnel à V^2 : la variation d'inclinaison qu'entraîne cette manœuvre est donc d'autant plus grande que V est plus grand. Pour cette double raison on voit combien la manœuvre de l'appareil deviendra délicate si Φ est très grand. C'est ce qui explique l'indocilité des monoplans très rapides.

DESCENTE ET ASCENSION D'UN AÉROPLANE. — Etudions maintenant le cas où l'aéroplane est animé d'un mouvement de translation descendant rectiligne et uniforme.

Soit toujours α l'angle d'attaque et γ l'angle de GV avec le plan horizontal.

Les équations (4) deviennent pour α et γ petits :

$$\Phi + P\gamma = V^2 (\lambda \alpha^2 + \mu) \tag{11}$$

$$P = \lambda V^2 \alpha + \Phi (\alpha - i) . \tag{12}$$

Mais $\Phi (\alpha - i)$ est très petit devant les deux autres termes de l'équation précédente, qui peut se remplacer approximativement par la suivante :

$$P = \lambda V^2 \alpha . \tag{13}$$

L'équation (11) donne alors :

$$\Phi + P\gamma = P \left[\alpha + \frac{\mu}{\lambda \alpha}\right] ; \tag{14}$$

on verrait, comme dans le cas du mouvement horizontal que (pour γ donné) la solution qui correspond à la petite valeur de α est seule stable; pour $\gamma = 0$, cette valeur est α_1; pour $\gamma > 0$, elle décroît et V augmente.

Si dans le régime normal, GH est horizontal ($\alpha_1 = i$), pendant la descente GH fait avec le plan horizontal l'angle $\gamma + i - \alpha > \gamma$. Le pilote doit incliner vers le bas son gouvernail d'avant pour faire piquer du nez à l'appareil et maintenir ensuite le gouvernail ainsi incliné : autrement, α étant $< i$, la résultante des réactions de l'air sur la voilure passerait en avant de G et non par G.

Si le pilote éteint le moteur pour descendre, il faut faire

$\Phi = 0$ dans l'équation (14). L'angle de descente correcte ne peut être inférieur[1] à $2\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$; si $\gamma = 2\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$, l'angle d'attaque α est égal à $\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} > i$, et pendant la descente le gouvernail d'avant doit rester braqué vers le haut, suivant un angle convenable[2]. Si on laissait le gouvernail parallèle à GH, le régime de chute correcte correspondant serait : $\alpha = i$, $\gamma = \frac{\Phi}{P}$. Enfin, pour que la vitesse verticale de descente fût minima, il faudrait gouverner de façon que $\alpha = \sqrt{\frac{3\mu}{\lambda}}$.

Pour étudier la montée de l'aéroplane, il suffit dans l'équation (14) de changer γ en $-\gamma$. L'équation ainsi obtenue montre aisément que γ ne peut dépasser une certaine valeur c. Pour $\gamma < c$, l'angle d'attaque α stable est plus grand que i, V est plus petit que V_1. Le gouvernail d'avant devra être maintenu incliné vers le haut.

STABILITÉ AUTOMATIQUE LONGITUDINALE. — Nous avons discuté la stabilité dans l'hypothèse où le pilote manœuvre de façon que G décrive une horizontale [ou plus généralement une droite donnée]. La discussion serait très différente [et d'ailleurs facile] dans l'hypothèse où le pilote manœuvrerait de façon que l'orientation de l'appareil fût invariable. Enfin, le cas où l'aviateur ne manœuvre pas

1. Si $2\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$ n'est pas petit, il n'est plus légitime de remplacer $\sin\gamma$ et $\sin\alpha$ par γ et α, et $\cos\gamma$. $\cos\alpha$ par l'unité.

2. Si avant d'atterrir le pilote relève brusquement le gouvernail d'avant, α augmente, la vitesse de G *se relève* tout d'abord en diminuant, mais ensuite l'appareil tend à adopter la descente correcte qui correspond à la nouvelle position du gouvernail c'est-à-dire à une valeur plus grande de α et à une pente de chute plus grande. Il importe donc de ne manœuvrer ainsi qu'au voisinage immédiat du sol.

prête à une discussion plus compliquée (voir p. 217) que nous omettrons.

Cette discussion conduit à la conclusion suivante : pour que le régime normal soit stable *automatiquement*, il faut que les racines de l'équation caractéristique d'un certain système d'équations linéaires à coefficients constants aient leur partie réelle négative ou nulle et que les racines purement imaginaires soient simples.

CONCLUSIONS. — Soient V_0, γ_0, α_0 et $\theta_0 = \gamma_0 + i - \alpha_0$ les valeurs qui caractérisent un des mouvements de translation rectilignes et uniformes dont peut être animé l'aéroplane. Si on éteint le moteur sans toucher au gouvernail d'avant, la pente de descente correcte de l'appareil est un certain angle γ_1 : pendant cette descente, V est égal à V_0, α à α_0, et on a :

$$\gamma_1 = \frac{\Phi}{P} + \gamma_0 = \alpha_0 + \frac{\mu}{\lambda\alpha_0} \cdot$$

En particulier, si $\gamma_0 = 0$ et $\alpha_0 = i$ [régime normal], on a :

$$\gamma_1 = \frac{\Phi}{P} = i + \frac{\mu}{\lambda i} \cdot$$

La stabilité longitudinale du régime V_0, γ_0, α_0 est la même que celle de la descente planée V_0, γ_1, α_0 correspondante (moteur éteint), — cela qu'il s'agisse de la stabilité automatique, ou de la stabilité dans l'hypothèse où le pilote manœuvre de façon à maintenir invariable, soit l'inclinaison de la trajectoire du centre de gravité, soit l'orientation de l'appareil autour de G.

Toute cette discussion ne s'applique qu'aux petites valeurs des angles α, γ, i et ne concerne que les mouvements où le plan de symétrie de l'aéroplane se meut dans un plan vertical fixe.

COMPARAISON AVEC L'EXPÉRIENCE. — Si l'appareil comprend deux, ou trois, etc. surfaces sustentatrices au lieu d'une seule, rien n'est changé aux résultats précédents

sous la réserve que chaque surface puisse être remplacée par un plan fictif qui lui est lié invariablement. C'est ce que nous avons admis d'après les formules de Soreau, interprétant les mesures de Lilienthal (voir p. 202). La comparaison des résultats théoriques avec l'expérience est un des moyens de se rendre compte si cette substitution est légitime, ou s'il faut, au contraire, employer les formules plus compliquées indiquées page 202 et qui ne modifient pas les grandes lignes de la théorie.

Procédés de stabilisation automatique. Stabilité longitudinale.

TANGAGE, ROULIS ET GYRATION. — Considérons un aéroplane que nous réduisons schématiquement à un plan sustentateur invariablement lié à une sphère et propulsé par deux hélices (p. 219). L'aéroplane est construit de façon que le centre de gravité G de l'appareil coïncide avec le centre de la sphère, et que l'axe de propulsion GH soit horizontal pendant la marche normale : pendant cette marche la vitesse a une certaine valeur, soit V_1 ; le plan de symétrie $x_1 G y_1$ de l'appareil coïncide avec un plan vertical fixe xOy que nous prenons comme plan du tableau ; soit Gx_1 la demi-droite GH, Gy_1 la verticale ascendante, Gz_1 la perpendiculaire au plan $x_1 G y_1$ menée vers la droite. Pour que le régime soit automatiquement stable, il faut qu'après une petite perturbation : 1° l'orientation du système autour de G reste voisine de son orientation correcte ; 2° G s'écarte peu de la droite horizontale qu'il décrit dans le régime correct. Ces deux conditions sont d'ailleurs liées entre elles. Insistons d'abord sur la première.

Considérons une orientation S de l'appareil peu différente de l'orientation correcte S_0. On peut toujours passer de la seconde à la première par une rotation d'un angle $\delta\chi$. autour d'une certaine demi-droite $O\omega$, ou si l'on veut par trois rotations : la première d'un certain angle $\delta\theta$ (>0 ou <0) autour de Gz_1, la seconde d'un certain angle $\delta\varphi$ (>0 ou <0) autour de Gx_1, la troisième d'un certain angle $\delta\psi$ (>0 ou <0) autour de Gy_1. Nous donnerons aux trois

angles θ, φ, ψ le nom d'angle de tangage, d'angle de roulis et d'angle de gyration.

Stabilité contre le tangage. — Un calcul que nous avons omis (p. 229), d'ailleurs analogue à celui de la page 217 montre que si, à un instant t_0, θ et θ' ont des valeurs θ_0, θ'_0, (γ étant encore nul), on a, à cet instant :

$$(1) \qquad I\theta'' = -2hV_1\theta'_0 - \sigma V_1^2\theta_0 \quad .$$

Soit $G_1 Z_1$ la projection de $G\zeta_1$ sur le plan sustentateur Π ; le raisonnement de la page 193 montre que la constante h est approximativement proportionnelle au moment d'inertie par rapport à G_1Z_1 de l'aire Π regardée comme homogène. Quant à la constante σ, elle est d'autant plus grande que G est situé plus au-dessous du métacentre δ et par suite de la voilure [p. 214]. Dans l'équation (1), le terme en θ_0 a une influence stabilisatrice, le terme en θ'_0 une influence amortissante.

Influence de la queue. — Imaginons que nous prolongions à l'arrière le plan de voilure par un rectangle AB qui soit horizontal dans la position normale de l'appareil (fig. 47). Si l'appareil se cabre (fig. 48), cette voilure supplémentaire introduira une résistance normale à AB qui tendra à rétablir l'orientation correcte de l'appareil : autrement dit, σ sera augmenté, ainsi d'ailleurs que h. Cet accroissement du moment stabilisateur et du

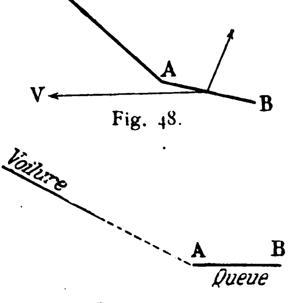


Fig. 48.

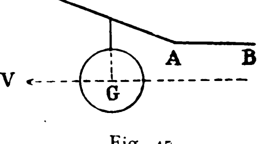


Fig. 47.

Fig. 49.

moment d'amortissement sera plus marqué encore si au lieu de prolonger immédiatement la voilure II du rectangle AB, on dispose ce rectangle très en arrière du plan II, en tandem. Autrement dit, une queue disposée très en arrière de l'appareil, et horizontale (ou moins inclinée que la voilure) dans le régime normal, jouera le rôle à la fois de stabilisateur et d'amortisseur[1].

Remarquons qu'un tel dispositif permet de relever le centre de gravité, sans que l'appareil cesse d'être stable; en effet, le métacentre δ [p. 214] se trouve notablement au-dessus du plan sustentateur, et σ restera positif si G est au-dessous de δ.

STABILISATION A L'AIDE D'UNE MASSE GYROSCOPIQUE. — Considérons un appareil qui n'ait qu'une seule hélice compensée par un poids latéral (p. 219). Supposons que, pendant une seconde par exemple, l'appareil tangue avec une vitesse θ'_0; le moment cinétique $\overline{GQ}$ de l'appareil par rapport à G est la résultante du vecteur invariable θ'_0 porté sur $G\zeta_1$ et du vecteur $C\omega$ porté sur Gx_1 [ω désignant la vitesse angulaire, positive ou négative, de l'hélice autour de Gx_1, et C le moment d'inertie de l'hélice autour de cet axe][2]. La dérivée géométrique $\frac{d\,\overline{GQ}}{dt}$ est un vecteur $\overline{GQ'}$ perpendiculaire à GH et égal à $C\omega\theta'_0$; le moment par rapport à G des réactions de l'air est équipollent à GQ', donc proportionnel à $C\omega$. Supposons $C\omega$ notable : il n'y aura de tangage sensible que si une force perturbatrice latérale [vent latéral, par exemple] intervient et cette force, pour pro-

1 Quand la queue a une surface notable, pour ne pas perdre entièrement son pouvoir sustentateur on la construit de façon que, dans le régime normal, elle soit inclinée vers le haut, mais moins que la voilure [appareils Voisin]. — Au lieu d'une telle queue, on peut disposer *en avant* de l'appareil un plan rectangulaire *plus incliné* que la voilure; un tel plan sera à la fois stabilisateur et amortisseur.

2. Nous négligeons les termes dus aux pièces mobiles du moteur. Il y aurait lieu d'en tenir compte si l'on employait un moteur rotatif, tel que le moteur Gnome.

duire un effet donné, devra être d'autant plus grande que $C\omega$ est plus grand. Une force perturbatrice située dans le plan de symétrie ne produirait sensiblement qu'une déviation latérale de GH, d'autant plus faible que $C\omega$ est plus grand.

De là l'idée de placer un fort volant sur l'arbre de l'hélice, volant dont l'effet gyroscopique s'opposerait aux déviations de l'axe GH. Mais ce serait là un procédé barbare, à cause de l'accroissement de poids et de la difficulté de gouverne qu'il entraîne.

STABILITÉ AUTOMATIQUE PAR MANŒUVRE GYROSCOPIQUE. — Revenons à l'appareil muni de deux hélices : au lieu d'un fort volant, plaçons sur l'arbre GH un voiant de petite masse dont la rotation très rapide ω est entretenue par le moteur. Supposons ce volant fixé par son centre de gravité G_1, tandis que son axe de révolution passe à l'intérieur d'un petit anneau fixé en H à la carcasse de l'aéroplane. Soit $G_1H = l$, C et A les moments d'inertie du volant autour de G_1H et d'un diamètre de son équateur. Pendant le tangage. on voit aisément que la réaction de l'anneau H a une composante parallèle à $G\zeta_1$ et égale à $\frac{C\omega\theta'}{l}$ et une composante normale à GH et à $G\zeta_1$ et égale à $\frac{A\theta''}{l}$; cette dernière est négligeable dans les applications, tandis que la première est notable si $C\omega$ est grand. L'axe matériel du volant exercera donc une forte pression latérale sur l'anneau, à droite par exemple si θ' est positif, c'est-à-dire si l'appareil se cabre, à gauche si θ' est négatif. Imaginons que les deux côtés de l'anneau au lieu d'être rigides soient deux ressorts qui commandent par des intermédiaires convenables le gouvernail d'avant, une pression sur le ressort droit abaissant ce gouvernail, une pression sur le ressort gauche le relevant. On voit que le gyroscope (sans accroissement de masse sensible de l'appareil) provoquera automatiquement la manœuvre qui réprime le tangage[1]. La force

1. C'est ce procédé qui est employé pour stabiliser automatiquement les torpilles mobiles.

de la commande gyroscopique sera proportionnelle, non pas comme on le dit souvent à la force vive de rotation $C\omega^2$ du volant, mais à $C\omega\theta'$.

Certains inventeurs ont préconisé des commandes automatiques provoquées par un pendule (stabilisation par manœuvre pendulaire), mais ce procédé est beaucoup moins sûr, efficace et réglable que le précédent. Quant à la stabilisation directe par un pendule de grande masse, c'est un procédé chimérique.

Influence de l'inertie. — Si, à un instant t_0, l'appareil est cabré par exemple ($\theta_0 > 0$, $\theta'_0 = 0$), V étant encore horizontale, l'équation (7) de la page 217 montre que θ_0'' est d'autant plus grand que I est plus petit. L'oscillation *commencera* donc d'autant plus violemment que la masse de l'aéroplane sera plus concentrée autour de G. C'est pourquoi la plupart des théoriciens conseillent de disséminer la masse de l'appareil pour accroître I. Mais la discussion approfondie de l'équation type :

$$I\theta'' + 2a\theta' + k^2\theta = 0 \qquad (2)$$

conduit plutôt à une conclusion opposée : si on étudie, en effet, le mouvement défini par (2) qui correspond aux conditions initiales θ_0, $\theta'_0 = 0$, $t = 0$, on voit aisément que les oscillations s'amortissent d'autant plus vite que I est plus petit. Si *au début* la vitesse d'oscillation est plus grande pour I petit, c'est là un désavantage qui ne dure qu'un instant [1]. En outre, l'appareil répondra d'autant plus pares-

1. Il est vrai que la même cause perturbatrice, *agissant pendant le même temps*, engendrerait un tangage initial d'autant plus marqué que I est plus petit : par exemple, le même choc donnerait à θ' une valeur initiale θ'_0 proportionnelle à $\frac{1}{I}$. Mais, même en tenant compte de ce fait, la supériorité de l'amortissement compenserait en fait très vite ce désavantage initial. Il importe en outre de remarquer que les causes naturelles de tangage [un vent ascendant par exemple] agiront d'autant plus longtemps que l'appareil sera plus paresseux à leur obéir et à tendre vers sa nouvelle orientation correcte.

seusement à la manœuvre du gouvernail horizontal que I sera plus grand. Pour ces raisons, opposées à la première, un appareil très sensible [genre *girouette*] apparaît donc comme supérieur à un appareil indolent. D'où la conclusion qu'il importe de ramasser le plus possible les masses lourdes autour de G : c'est la règle qu'ont adoptée en fait la plupart des praticiens.

Sensibilité du gouvernail horizontal. — Imaginons un appareil très mobile autour de son centre de gravité, et inclinons vers le haut le gouvernail d'avant : l'appareil va se cabrer avant que la vitesse de G ait sensiblement changé, et l'angle d'attaque de l'air sur le gouvernail va croître (lors même qu'on ne touche pas au gouvernail) : l'efficacité du gouvernail va donc croître de par l'effet même de la manœuvre. De plus, cette manœuvre a pour objet de monter; or la pression de l'air sur le gouvernail aura une composante verticale ascendante, faible il est vrai, mais qui accélérera la montée.

Quand au contraire le gouvernail horizontal est placé à l'arrière, il faut, pour faire cabrer l'appareil, incliner le gouvernail vers le bas (de l'arrière à l'avant), et (si on n'y touche plus) son efficacité diminue à mesure que la manœuvre produit son effet : à partir d'une certaine inclinaison, il s'oppose même à la rotation commencée. Enfin la pression de l'air sur le gouvernail *retarde* la montée.

Le gouvernail horizontal est donc plus efficace à l'avant qu'à l'arrière, mais plus sensible. En particulier, si le gouvernail d'avant engage (c'est-à-dire s'il est pris en-dessus par le vent) et si on ne le redresse pas, il fera piquer du nez à l'appareil *avec une force croissante* et si cette force n'est pas contrebalancée par les forces stabilisatrices de l'appareil, une chute dangereuse s'ensuivra. Au contraire, à l'arrière le même gouvernail corrige en quelque sorte de lui-même ses propres effets.

On devra donc placer le gouvernail horizontal en avant si on veut avant tout que l'appareil soit très docile, et en arrière si on veut avant tout qu'il soit stable[1].

1. Si on disposait un double gouvernail horizontal symétrique

Il convient enfin de remarquer que tous les procédés de stabilisation automatique [queue ou autres] rendent l'appareil moins manœuvrable, puisqu'ils s'opposent à tout changement d'orientation de l'appareil dans les conditions normales. Il n'y aurait d'exception à cette règle que si ces procédés cessaient d'agir pendant la manœuvre : par exemple, dans le cas de la stabilisation par manœuvre gyroscopique, si le pilote employait le gyroscope lui-même pour manœuvrer.

Stabilité latérale.

STABILITÉ CONTRE LE ROULIS. — Supposons qu'on fasse tourner l'appareil d'un angle $\delta\varphi$ autour de GH ; rien n'est changé au mouvement de l'air par rapport à l'appareil. Si donc la vitesse V gardait la même direction, aucune force ne tendrait à redresser l'appareil ; un mouvement de roulis une fois commencé ne serait arrêté que par les forces d'amortissement, forces d'autant plus grandes que l'envergure de la voilure serait plus grande [voir la p. 193], l'appareil se placerait dans une orientation $\delta\varphi$ sans se redresser jamais. On conclut de là souvent qu'un aéroplane ne peut être automatiquement stable contre le roulis. C'est une conclusion trop hâtive. Car en fait, V ne gardera pas une direction constante ; si, par exemple, l'appareil penche à gauche, la résultante CR des pressions de l'air sur la voilure [normale à la voilure] pousse G à gauche ; la projection de V sur le plan de voilure est dirigée vers la gauche, par suite le centre de pressions C passe à gauche de G [p. 191], et la force CR tend à redresser l'appareil.

Mais il convient de remarquer que cet effet stabilisateur est lent à se produire. Dans le cas du tangage, un couple de rappel existe aussitôt ; dans le cas du roulis, ce couple, nul initialement, ne devient appréciable que quand la composante latérale des réactions de l'air a fait dévier sensiblement la vitesse de G.

Dans la réalité, le redressement est hâté instinctivement

par rapport à G, son efficacité resterait constante pendant la manœuvre.

par le pilote. Quand l'appareil penche à gauche, le pilote se maintient naturellement dans la verticale, ce qui revient à reporter à droite de G le centre de gravité de l'appareil. D'où un couple de rappel immédiat.

Enfin, il serait loisible d'employer contre le roulis comme contre le tangage une commande gyroscopique automatique. Un même gyroscope [1], d'axe vertical, de petite masse et de rotation rapide, pourrait manœuvrer automatiquement à la fois contre le roulis et le tangage [p. 233].

STABILITÉ CONTRE LA GYRATION. — Supposons que l'appareil ait tourné autour de la verticale ascendante Gy de l'ange $\delta\varphi$, de gauche à droite, par exemple, V gardant encore la même direction. Le centre de pressions vient à gauche de G, la résultante $\overline{GR}$ des pressions a une composante horizontale dirigée à droite ; G dévie donc à droite et l'appareil penche à droite ; cette dernière circonstance accroît encore la déviation de G. De plus, le moment de $\overline{GR}$ par rapport à G a une composante verticale qui tend à ramener l'appareil dans le vent, mais cette composante est très faible. On l'accroît considérablement en complétant l'appareil d'une quille placée dans le plan de symétrie ; quand la quille Q reçoit l'air sous un petit angle [à droite, par exemple], le centre des pressions du plan Q est un certain point Γ. La quille est disposée de façon que Γ soit en arrière [2] de Gv et on appelle *coefficient d'empennage* la distance des deux verticales de G et Γ.

Nous allons discuter brièvement en tenant compte de la quille, la stabilité *contre le tangage et le roulis combinés*. Nous considérons exclusivement un appareil *très mobile* autour de G, en sorte que l'effet des forces perturbatrices se fait sentir d'abord sur l'orientation de l'aéroplane et ensuite seulement sur G. En outre, nous supposons que

1. Un gros volant d'axe vertical s'opposerait à la fois au tangage et au roulis. Mais ce serait là un procédé détestable [p. 232].

2. Si le gouvernail vertical est en arrière, il appuie le rôle stabilisateur de la quille. Au contraire, s'il est en avant il tend à accentuer automatiquement la gyration.

l'ellipsoïde central d'inertie de tout l'appareil est une sphère[1]. Soit alors, à un instant t, $\overline{G\omega}$ la rotation instantanée de l'appareil et $\overline{GK}$ le moment par rapport à G de toutes les réactions de l'air ; le théorème des moments cinétiques appliqué au mouvement autour de G donne :

$$\text{(1)} \qquad I \frac{d.\,\overline{G\omega}}{dt} = \overline{GK}$$

En particulier, si ω est nul à l'instant t, l'appareil entre les instants t et $t + dt$, tourne autour de la demi-droite GK d'un angle égal à $\frac{GKdt}{2I}$.

Stabilité latérale. — Considérons l'appareil animé de la vitesse $\overline{V}$, sans vitesse actuelle de roulis ni de gyration, mais ayant tourné d'un petit angle $\delta\chi$ autour d'une certaine demi-droite GD du plan xGy, cette rotation peut être décomposée en une rotation d'un angle $\delta\varphi$ [$\delta\varphi > o$ ou $< o$] autour de Gx et une rotation d'un angle $\delta\psi$ [$\delta\psi < o$ ou $< o$] autour de Gy. Elle est également décomposable en une rotation $GE = \frac{\delta\psi}{\sin i}$ autour de GL [GL intersection du plan de symétrie et du plan de voilure]. La position de la voilure par rapport à $\overline{V}$ ne dépend que de ce dernier déplacement ; le moment par rapport à G des réactions de l'air sur la voilure a le sens opposé[2] à GE et est proportionnel à $\delta\psi$. La position de la quille par rapport à $\overline{V}$ ne dépend que du déplacement $\delta\psi$: si (comme nous le suppo-

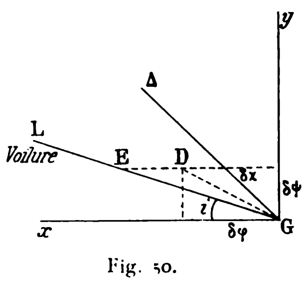


Fig. 50.

1. Si cette dernière condition n'est pas remplie, la discussion subsiste dans ses grandes lignes, mais avec des complications de calcul.

2. En effet, si $\delta\psi > o$, l'appareil met cap à droite, C est à gauche de G, et CR tend à faire pencher l'appareil à droite.

sons) G et L sont sur la même horizontale, le moment par rapport à G des réactions de l'air sur la quille a le sens opposé à Gy et est proportionnel à $\delta\psi$. Le moment $\overline{GK}$ a donc une direction $G\Delta$ comprise entre Gx et Gy et qui fait avec Gx un angle invariable j $\left[0 < j < \frac{\pi}{2}\right]$: $\overline{GK}$ a le sens $G\Delta$ ou le sens inverse, suivant que $\delta\psi$ est négatif ou positif; compté positivement dans le sens $G\Delta$, GK est égal en grandeur et signe à $-k\delta\psi$, k désignant une certaine constante positive. Tant que $\overline{V}$ garde sensiblement la même direction, on obtient pour φ et ψ petits, et en négligeant les forces d'amortissement :

$$I\varphi'' = -k\cos j\ \psi \quad , \qquad I\psi'' = -k\sin j\ \psi \quad .$$

L'angle ψ oscillerait donc entre deux valeurs égales et de signes contraires, ainsi que la différence[1] $\varphi - \varphi_0$, si les forces d'amortissement n'existaient pas : mais ces forces éteignent très vite les oscillations ; au bout d'un temps très court, ψ est sensiblement égal à zéro et φ à φ_0. L'angle φ ne revient à zéro que dans la période ultérieure du mouvement qui commence quand $\overline{V}$ a subi une déviation appréciable.

Plus le coefficient $k \sin j$ est grand, et plus les oscillations sont rapides et rapidement amorties. *Or on augmente* $k \sin j$ *en disposant la quille de façon que* Γ *soit, non seulement en arrière, mais au-dessus de* G.

Remarquons que si φ_0 et ψ_0 sont de même signe, φ_0'' est de signe contraire à φ_0, et φ commence par diminuer en valeur absolue. D'après cela, soit $\varphi_0 > 0$, $\psi_0 = 0$: si on manœuvre le gouvernail vertical de façon que l'appareil mette brusquement cap à droite, φ diminue tout d'abord.

1. Ceci suppose que, pour $t = 0$, φ et ψ ont des valeurs petites φ_0 et ψ_0, et que φ'_0, ψ'_0 sont nuls. Quand φ'_0 et ψ'_0 ne sont pas nuls tous deux, la quantité $\varphi - \varphi_0$ doit être remplacée par $\varphi - \varphi_0 - \varphi'_0 t$; s'il n'y avait pas d'amortissement, la valeur moyenne de φ' serait φ'_0. En fait, les forces d'amortissement éteignent très vite et les oscillations de ψ et de φ et la vitesse moyenne φ', mais ne ramènent pas φ à zéro. La conclusion est la même que dans le cas où $\varphi'_0 = 0$.

On voit qu'un pilote qui ne dispose que des deux gouvernails horizontal et vertical, mais point d'ailerons ni de gauchissement peut, cependant exercer indirectement une action sur le roulis de l'appareil.

Toute cette discussion suppose que l'appareil est genre girouette. Dans le cas opposé où son inertie de rotation serait presque insurmontable et dans les cas intermédiaires, les conclusions seraient différentes.

D'une manière générale, une théorie précise de la stabilité autour de G ne peut être faite indépendamment de la stabilité du mouvement du point G lui-même. Les deux problèmes sont inséparables. La méthode consiste à étudier les mouvements quelconques [tangage, roulis, gyration et variation de $\overline{V}$ combinés] voisins du régime normal: elle est la même que dans le cas simple du tangage [p. 228 et 217)] et n'exige que de la patience, mais les calculs qu'elle entraîne sont assez compliqués. D'autre part, les conditions ainsi obtenues n'ont pas encore un grand intérêt pratique, parce que les lois de la résistance de l'air quand il attaque la voilure un peu de côté sont trop mal connues [p. 191].

Si succinctes qu'elles soient, les conditions précédentes et celles de la page 217 suffisent à faire comprendre la stabilité des papillons en papier, munis d'une quille et légèrement retroussés à l'arrière, et portant en tête un poids assez lourd (un paquet de cire, par exemple) qui reporte à l'avant et au-dessous des ailes le centre de gravité de l'appareil. Ces jouets d'enfants peuvent être regardés comme des monoplans bons planeurs en miniature.

Dans les biplans cloisonnés (système Chanute et Voisin) ce sont les cloisons verticales qui jouent le rôle de la quille : quand le vent relatif est un peu oblique par rapport au plan de symétrie xGy, la résultante des pressions de l'air sur les parois verticales rencontre le plan xGy en un certain point L (centre vertical des pressions) qui est en arrière et au-dessus de G. D'après Chanute, le cloisonnement est plus efficace que la quille, parce qu'il emprisonne les filets d'air animés d'une grande vitesse, qui refusent de se laisser dévier et tendent par suite à maintenir l'orientation de l'appareil : le phénomène serait analogue à celui qui se passe dans une lance de pompier, qu'il est difficile

de dévier quand elle est traversée par un puissant jet d'eau. Cette opinion [dont la raison théorique invoquée est fort contestable] semble confirmée par l'expérience [stabilité remarquable des cerfs-volants en forme de boîte à cigare employés en météorologie, etc.]. Mais le cloisonnement entraîne un accroissement notable des résistances à l'avancement.

Une règle de stabilité adoptée par certains auteurs est la suivante : l'aire des surfaces sustentatrices et stabilisatrices projetée sur un plan quelconque ne doit pas descendre au-dessous d'un certain minimum. En effet, supposons que ces surfaces soient des plans parallèles à une certaine droite OD : leur projection sur un plan perpendiculaire à OD a une aire nulle, et d'autre part, si $\overline{V}$ est parallèle à OD, la force sustentatrice est nulle. Cette règle interviendrait donc sûrement dans la construction d'un aéroplane qui ne devrait chavirer dans aucune position. Mais quand il s'agit de la stabilité au voisinage de la position correcte de l'appareil, on n'en peut rien conclure de précis.

Langley préconise la forme du dièdre pour les ailes, le dièdre (très ouvert) étant tourné vers le haut [forme en \/ de la surface sustentatrice] ; d'autres inventeurs préconisent la forme en /\. Si on assimile les deux ailes à des plans parfaitement lisses, et si on admet que l'air agit sur chaque aile comme si elle était seule, on voit en raisonnant comme à la page 238 que c'est la première forme qui serait préférable. Mais dans notre ignorance actuelle des lois des réactions de l'air sur les surfaces minces, l'expérience seule peut trancher entre ces divers procédés.

Remarques générales. — Supposons que l'appareil[1] ait subi une variation d'inclinaison dans l'air parfaitement calme : plus est grand le couple de rappel qui tend à le ramener vers la position correcte, et plus l'appareil est automatiquement stable. Par exemple, supposons que l'appareil ait piqué du nez; plus le centre de gravité est bas, et plus le couple qui redresse le nez de l'appareil est grand.

1. Nous n'avons considéré que des appareils où la poussée résultante des hélices passe par G. Quand il n'en est pas ainsi, certaines modifications doivent être apportées aux conclusions précédentes.

Mais cette stabilité entraîne un désavantage. Imaginons qu'une perturbation se produise dans l'air, par exemple que l'appareil traverse une colonne d'air ascendante. L'angle d'attaque croît, le centre des pressions recule ; le couple qui tend à faire tourner l'appareil autour de G est d'autant plus grand que G est plus bas (p. 214). Si on veut que la poussée des hélices soit toujours horizontale, il faut, pour maintenir constante l'orientation de l'appareil, provoquer, à l'aide du gouvernail horizontal un contre-couple d'autant plus grand que G est plus bas, la manœuvre deviendra en fait impraticable si G est trop bas.

C'est là le type des conditions antagonistes entre lesquelles on se trouve enserré dans la construction des aéroplanes. Suivant qu'on porte son attention sur telle qualité ou sur telle autre, les règles qu'on est conduit à formuler sont toutes différentes. D'où la possibilité de types très divers d'aéroplanes, présentant chacun leurs avantages spéciaux.

Si on cherche avant tout la docilité de l'appareil, on ne lui donnera ni queue, ni quille, ni cloisons verticales ; on ramassera les masses autour de G, qui sera lui-même très peu au-dessous de la voilure. On placera le gouvernail horizontal et le gouvernail vertical[1] en avant.

C'est le type d'appareil qui exigera le plus d'adresse dans la manœuvre en air calme, mais que le pilote pourra le mieux soustraire aux perturbations de l'air. A un tel type est comparable le Wright. Toutefois, dans ce dernier appareil, le gouvernail vertical est en arrière : mais il est appuyé en avant par un double petit plan fixe et parallèle au plan de symétrie de l'aéroplane.

Enfin, nous n'avons considéré que les appareils où la voi-

1. On peut, en effet, répéter sur le gouvernail vertical les remarques de la page 235 sur le gouvernail horizontal. Si le gouvernail vertical est à l'arrière, quand on vire, pour une inclinaison donnée de ce gouvernail son efficacité *diminue* à mesure que l'appareil gyre ; en outre, les réactions de l'air sur le gouvernail ont une résultante qui *contrarie* le mouvement voulu de G. Si au contraire l'appareil est en avant, l'efficacité du gouvernail croît à mesure que l'appareil obéit à la manœuvre, et la résultante des réactions de l'air sur le gouvernail appuie le mouvement de G.

lure est liée invariablement au corps de l'aéroplane. On a imaginé des appareils où la voilure peut avancer ou reculer d'un mouvement de translation par rapport à l'esquif; d'autres où la voilure peut tourner autour d'un axe perpendiculaire au plan de symétrie de l'esquif; d'autres enfin où la voilure et l'esquif sont reliés par une suspension à la cardan. Chacun de ces types exigerait une discussion spéciale.

Virage d'un aéroplane.

VIRAGE CORRECT ET VIRAGE PARFAIT. — Considérons des axes $O\xi\eta\zeta$ animés d'une rotation uniforme ω ($>$ o ou $<$ o) autour de la verticale ascendante fixe $O\eta$, et un aéroplane qui, dans son mouvement, garde une position invariable par rapport à ces axes. Nous dirons que l'appareil effectue un *virage correct* autour de O; nous dirons que le virage est *parfait* si par surcroît le plan de symétrie de l'appareil est tangent à la circonférence horizontale que décrit le centre de gravité G.

Dans le cas du virage correct, l'appareil dérapera en dehors ou en dedans suivant que l'avant de l'appareil sera en dehors ou en dedans du cercle de virage.

Le mouvement instantané de l'appareil peut se décomposer en une translation de vitesse $\overline{V}$ [$\overline{V}$ vitesse du centre de gravité] et une rotation ω autour de la verticale ascendante Gy : en valeur absolue, $\omega = \frac{V}{R}$, R désignant le rayon de virage, c'est-à-dire le rayon de la circonférence que décrit G.

Soit G_1H_1 la projection de Gy sur le plan[1] sustentateur Π et soit $\beta =$ angle (Gy, G_1H_1); le raisonnement de la page 193 montre que la rotation ω accroît les réactions de l'air de forces dont la somme géométrique est un certain vecteur ρ [normal à Π], et dont le moment par rapport à G est un vecteur $G\sigma$ parallèle au plan Π, faisant un angle assez faible

1. Comme dans l'étude de la stabilité latérale, nous considérons un aéroplane schématique formé d'un plan sustentateur parfaitement lisse, d'une sphère (esquif) et de deux hélices symétriques.

avec G_1H_1 et dont la projection sur la demi-droite G_1H_1 est représentable en grandeur et signe par : $-\tau V\omega \cos\beta$, τ désignant une quantité positive (moment par rapport à G_1H_1 de l'aire Π regardée comme homogène). Le point G_1 coïncide avec le centre des pressions qui correspond au régime correct. Si le plan de symétrie xGy de l'appareil est maintenu vertical, G_1H_1 est dans ce plan, ρ est nul, $G\sigma$ a la direction G_1H' [fig. 51] et le couple d'axe $G\sigma$ tend à faire pencher l'appareil vers l'intérieur du virage. Si le plan xGy penche vers l'intérieur du virage, d'un angle très grand devant i (i angle de GH et de Π), G_1H_1 est sensiblement parallèle au grand côté de Π, $\bar{\rho}$ est ascendant et d'ailleurs très faible et le couple d'axe $G\sigma$ tend à faire piquer du nez à l'appareil. Nous négligerons ρ dans ce qui suit.

Quand le virage est parfait, la vitesse $\overline{V}$ est dans le plan de symétrie de l'appareil, mais son angle avec Π, soit α, diffère de l'angle d'attaque du régime normal; nous verrons dans un instant qu'il est plus grand. Le moment par rapport à G des réactions de l'air dues à la vitesse $\overline{V}$ sur la voilure, soit GK, serait un certain vecteur ayant la direction G_1H'' et tendrait à faire piquer du nez à l'appareil. Quand le virage est seulement *correct*, ce moment a une composante suivant G_1H'' qui tend à faire piquer du nez à l'appareil et une composante suivant G_1H' qui tend à faire pencher l'appareil vers l'intérieur ou vers l'extérieur du virage suivant que l'avant dérape en dedans ou en dehors.

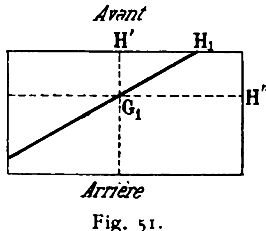


Fig. 51.

En définitive, les réactions de l'air sur la voilure ont, par rapport à G, un moment égal à $\overline{G\sigma} + \overline{GK}$; ce moment est parallèle au plan de la voilure ; les composantes de $\overline{G\sigma}$ et $\overline{GK}$ suivant G_1H'' tendent la première dans tous les cas, la seconde quand l'appareil dérape en dedans, à faire pencher l'aéroplane vers l'intérieur du virage ; leurs composantes suivant G_1H' tendent toutes deux à lui faire piquer du nez. Dans le cas où le virage est *parfait* et où l'angle

dont penche l'appareil est grand devant i, ces dernières composantes existent seules sensiblement.

ÉQUILIBRE RELATIF DE L'AÉROPLANE. — Pour former les conditions d'équilibre relatif de l'aéroplane, il nous faut ajouter à la pesanteur, pour chaque élément P (de masse m) du système la force $m\omega^2 \overline{P'P}$, P' désignant la projection de P sur $O\eta$. La somme géométrique F de ces forces est comme on sait, la même que si toute la masse M du système était concentrée en G; si G' est la projection de G sur $O\eta$, elle coïncide avec le vecteur $M\omega^2 \overline{G'G}$; en valeur absolue elle est égale à $\frac{MV^2}{R}$.

Calculons d'autre part le moment par rapport à G, soit $\overline{G\sigma_1}$, de ces forces centrifuges. Si l'ellipsoïde central d'inertie est une sphère, ce moment est nul, car la parallèle Gy à $O\eta$ est axe central d'inertie. Dans le cas général, soit $Gxyz$ le trièdre trirectangle positif où Gx a le sens de $\overline{V}$ et où Gy est la verticale ascendante : les projections de $\overline{G\sigma_1}$ sur Gx, Gy, Gz sont respectivement : $\omega^2 \Sigma myz$, o, $-\omega^2 \Sigma mxy$.

Le vecteur $G\sigma_1$ est donc toujours perpendiculaire à Gy. Quand le plan de symétrie de l'appareil reste vertical, Σmyz est nul, et $G\sigma_1$ a la direction Gz, parallèle à G_1H''. Quand l'angle de ce plan et de la verticale reste petit, $G\sigma_1$ a sensiblement la direction de G_1H''.

Pour que l'appareil *une fois placé dans l'orientation voulue et animé de la rotation voulue* $\omega = \frac{V}{R}$, reste en équilibre relatif, il faut donc d'abord que le pilote place les deux gouvernails et les ailerons dans une position telle que le moment par rapport à G des réactions de l'air sur ces gouvernes soit égal et directement opposé à $\overline{G\sigma} + \overline{GK} + \overline{G\sigma_1}$.

Admettons que l'ellipsoïde central d'inertie soit une sphère : $G\sigma_1$ est nul. Si le virage est parfait et d'inclinaison notable, $\overline{G\sigma} + \overline{GK}$ a sensiblement la direction GH'', il suffit de maintenir le gouvernail d'avant braqué vers le haut d'un angle convenable; si le virage est seulement correct avec dérapage en dedans, il faut en outre maintenir incliné vers le haut l'aileron situé vers le centre de virage.

Conditions du virage parfait. — Exprimons maintenant que la somme géométrique des réactions de l'air, du poids $\overline{P}$ et de la force $\overline{F}$ est nulle. Soit $\overline{Gg}$ l'accélération de la pesanteur, $\overline{Gh}$ le vecteur $\frac{V^2}{R}$ porté sur G'G, et Gg_1, la résultante de $\overline{Gg}$ et $\overline{Gh}$; $\overline{Gg}_1$ est situé dans le plan normal à $\overline{V}$ et fait avec la verticale descendante un angle aigu τ dirigé vers l'extérieur du virage et dont la tangente est $\frac{V^2}{Rg}$; posons $P_1 = Mg_1 = M\sqrt{g^2 + \frac{V^4}{R^2}}$. Par hypothèse, le plan de symétrie de l'appareil, soit Π_1, renferme $\overline{V}$; la somme des projections des forces sur la perpendiculaire à ce plan se réduit à la projection de P_1 ; cette dernière projection doit être nulle, autrement dit le plan Π_1 doit renfermer le vecteur Gg_1 ; le plan Π_1 contenant à la fois l'horizontale $\overline{V}$ et la droite Gg_1 perpendiculaire à V, l'angle de Π_1 et de la verticale est l'angle $\tau = gGg_1$. L'appareil penche donc vers l'intérieur du virage de l'angle τ.

D'autre part, projetons sur la direction $\overline{V}$ et la perpendiculaire à V située dans le plan Π_1. Il vient aussitôt, en appelant toujours α le petit angle d'attaque

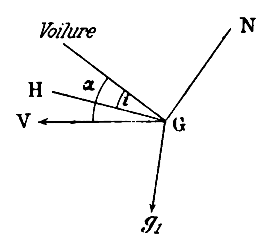


Fig. 52.

$$\alpha = VGH + i :$$

$$(1) \begin{cases} P_1 = \lambda V^2 \alpha + \Phi(\alpha - i) \\ \Phi = \mu V^2 + \lambda V^2 \alpha^2 \end{cases} .$$

Autrement dit, ces conditions sont les mêmes que dans le cas d'un mouvement uniforme [p. 222] où $\overline{g}$ serait remplacé par $\overline{g}_1$. On peut négliger, dans la première équation, le terme $\Phi(\alpha - i)$. Comme P_1 est plus grand que P, la valeur de α donnée par (1) est plus grande que i, et celle de V plus petite. L'appareil aura donc une position un peu cabrée et sa vitesse sera un peu ralentie.

Dans les applications, $\frac{V^2}{R}$ est notablement plus petit[1] que g, et on peut écrire approximativement

$$P_1 = P\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{V^2}{Rg}\right)^2\right].$$

La valeur de V différera assez peu de la valeur V_0 qui correspond au régime normal, et on pourra dans la première équation (1) remplacer P_1 par

$$P\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{V_0^2}{Rg}\right)^2\right] = P'.$$

Pour que le virage étudié soit possible, il faut que Φ soit supérieur à $2\,P'\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$; autrement dit, il faut qu'on ait :

$$P\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{V_0^2}{Rg}\right)^2\right] < \frac{\Phi}{2}\sqrt{\frac{\lambda}{\mu}},$$

c'est-à-dire :

$$(2) \qquad \left(\frac{V_0^2}{Rg}\right)^2 < \frac{1}{P}\left(\Phi\sqrt{\frac{\lambda}{\mu}} - 2\,P\right);$$

R ne peut donc être inférieur à une certaine limite, rayon minimum du virage parfait.

Remarque. — Plaçons-nous pour simplifier, dans le cas où l'ellipsoïde central d'inertie est une sphère, et où L est grand devant i.

Une fois l'appareil placé dans l'orientation convenable et animé de la rotation ω, le virage parfait s'accomplit, le gouvernail vertical et les ailerons ayant repris sensiblement leur position normale[2] : seul le gouvernail horizontal doit être maintenu braqué. *Mais pour provoquer exactement la*

1. Par exemple, si $V = 20^m$ (ou 72^{km} à l'heure) et $R = 100^m$, $\frac{V^2}{Rg} = \frac{2}{5}$, et $\frac{1}{2}\left(\frac{V^2}{Rg}\right)^2$ moindre que $\frac{1}{12}$.

2. En réalité, il faudrait maintenir *légèrement* braqué vers le haut l'aileron situé vers le centre du virage, tandis que pour provoquer la nouvelle orientation de l'appareil, il a fallu momentanément effectuer énergiquement la manœuvre inverse.

nouvelle orientation de l'appareil et notamment pour le faire pencher vers le centre du virage, il faut manœuvrer à la fois les ailerons (ou le gauchissement) et les deux gouvernails. Pour obtenir vite l'orientation voulue, on manœuvrera énergiquement les ailerons (ou le gauchissement) de façon à provoquer presque immédiatement l'inclinaison latérale désirée, et on corrigera la manœuvre à l'aide des deux gouvernails. Le gouvernail d'arrière devra en outre avoir communiqué à l'appareil la rotation ω.

STABILITÉ D'UN VIRAGE PARFAIT. — VIRAGE A L'AIDE DE DEUX MANŒUVRES. — La stabilité d'un virage parfait se discuterait comme celle du régime normal [p. 228 et 240], en étudiant les petits mouvements voisins de l'équilibre relatif : mais il faudrait tenir compte des forces centrifuges composées. Toutefois, si le virage est très large, ces dernières sont négligeables, et la discussion est alors tout à fait identique à celle du régime normal à cela près que $\bar{g}$ est remplacé par $\bar{g_1}$.

En particulier, la stabilité latérale automatique sera meilleure si l'appareil est muni d'une quille (ou de cloisons) dont le centre de pressions est à l'arrière et au-dessus de G. Pendant le virage parfait, ces parois auxiliaires n'interviendront pas; mais elles tendront à ramener l'appareil au régime parfait, s'il s'en écarte.

D'après cela, imaginons un appareil cloisonné qui n'a ni ailerons ni gauchissement (système Voisin); pour virer à droite, par exemple, on tourne vers la droite le gouvernail d'arrière, l'appareil met cap à droite; les pressions de l'air sur la voilure et les cloisons font pencher l'appareil à droite. Quand il est suffisamment penché, imaginons qu'on remette en place le gouvernail d'arrière, le gouvernail d'avant étant maintenu dans une inclinaison convenable. L'appareil en général ne sera pas alors dans le vent relatif; autrement dit, son plan de symétrie fera un certain angle avec V. Mais l'appareil, après quelques oscillations, rentrera dans le vent et effectuera sensiblement un virage parfait.

On procéderait de façon analogue si l'appareil (à quille ou cloisons) possédait des ailerons (ou un gauchissement), mais point de gouvernail d'arrière.

CONCLUSIONS. COMPARAISON AVEC LA BICYCLETTE ET LE NAVIRE. — On étudierait d'une manière analogue les virages corrects; nous omettrons ces calculs et nous nous contenterons d'en indiquer les conclusions principales.

Considérons un aéroplane, sans quille ni cloison verticale, mais muni des trois organes de manœuvres (gouvernails horizontal et vertical et ailerons ou gauchissement). Cet appareil peut d'une infinité de façons effectuer un virage correct, de rayon donné R, c'est-à-dire un virage dans lequel le centre de gravité G décrit un cercle horizontal donné tandis que l'appareil garde une orientation constante par rapport à la verticale et à la vitesse $\overline{V}$ de G. Toutefois R doit être supérieur à un certain minimum R_0 qui dépend notamment de la force propulsive. Dans un de ces virages [virage *parfait*] le plan de symétrie de l'appareil est tangent à $\overline{V}$; l'appareil penche alors vers l'intérieur du virage d'un angle τ dont la tangente est égale à $\frac{V^2}{Rg}$ (comme dans le cas de la bicyclette). Mais le pilote (pour R donné $> R_0$) peut choisir arbitrairement (entre certaines limites) l'angle τ_1 dont il penche; ces limites s'écartent d'autant plus de τ que R est plus grand, et pour R très grand l'appareil peut même virer sans se pencher sous la seule poussée des hélices.

Quand l'appareil est pourvu de cloisons verticales, rien n'est changé aux conditions du virage parfait, mais le rayon minimum des autres virages corrects est diminué pour chaque valeur $\tau_1 < \tau$. En particulier, si l'aire des cloisons verticales est notable, l'appareil pourra effectuer, sans pencher, un virage qui ne soit pas de rayon exagéré.

Si l'appareil n'est muni que du gouvernail vertical et du gouvernail horizontal, l'appareil sera susceptible (pour R donné $> R_0$) d'un des virages précédents; pour une répartition convenable des masses de l'aéroplane, ce virage ne différera pas du virage parfait. Il en serait de même si l'appareil n'était muni que du gouvernail horizontal et d'ailerons [ou gauchissement].

Remarquons enfin qu'on pourrait diminuer le rayon de virage si on laissait l'appareil descendre pendant le virage.

Les différences avec le virage d'une bicyclette sont évidentes : pour un rayon de virage et une vitesse de G donnés, la bicyclette penche vers l'intérieur du virage d'un angle donné [1] ; l'aéroplane comporte au contraire une infinité de virages corrects, parmi lesquels le virage parfait est seul assimilable au virage de la bicyclette.

Pour amorcer le virage d'une bicyclette, le cycliste doit se pencher un peu en dehors du plan de symétrie et incliner le guidon (du côté du centre du virage) ; une fois le système incliné d'un angle convenable et animé d'une rotation convenable autour de la verticale de son centre de gravité, le cycliste rentre dans le plan de symétrie de l'appareil et l'obliquité du guidon doit seule être maintenue ; ce sont les réactions (obliques) du sol sur les roues qui assurent à la fois l'équilibre et le virage. Le virage parfait d'un aéroplane doit être amorcé par trois manœuvres ; celle des ailerons correspond au déplacement du corps du cycliste et peut être remplacée par le déplacement latéral d'un poids ; la manœuvre des deux gouvernails correspond à celle du guidon ; mais une fois l'appareil incliné d'un angle convenable et animé de la rotation correspondante ω autour de la verticale de G, le gouvernail vertical doit être remis sensiblement en place et la manœuvre des ailerons annulée et même légèrement inversée ; seule la manœuvre du gouvernail horizontal doit être maintenue ; quand le virage est terminé il faut opérer des manœuvres inverses de celles de l'amorçage [2].

1. Nous supposons ici que, *pendant le virage*, le cavalier a, par rapport au cadre, même position qu'en route rectiligne ; en réalité, à chaque position du corps du cavalier (position qui varie habituellement pendant la période où le virage s'amorce) correspond une inclinaison différente de la bicyclette.

2. Au point de vue mathématique, l'aéroplane est un solide libre dont la position dépend de six paramètres : les trois manœuvres permettent d'imposer à ces paramètres trois conditions arbitraires [entre certaines limites], par exemple G décrit un cercle horizontal [2 conditions] et le plan de symétrie de l'appareil est tangent à ce cercle [1 condition]. Si l'appareil n'est muni que de deux manœuvres, on ne pourra plus imposer que deux conditions, par exemple G décrit un cercle horizontal.

La bicyclette dépend, elle, de 9 paramètres [6 pour le cadre,

Comparons enfin le virage d'un aéroplane et celui d'un navire. Le virage d'un navire est provoqué par la manœuvre du gouvernail arrière qui fait gyrer le navire autour de son centre de gravité, à droite, par exemple ; le navire présentant le flanc gauche à la vitesse relative des filets liquides, les réactions de l'eau sur ce flanc l'emportent sur les réactions que subit le flanc droit, et le centre de gravité dévie à droite. L'hélice dont la poussée a une composante vers le centre du virage appuie cette déviation, mais faiblement : même si on l'arrêtait, le navire virerait. Dans un virage correct, G décrit un cercle et le plan de symétrie du navire (qui renferme l'axe de propulsion) fait un angle constant avec la vitesse $\overline{V}$ de G, l'avant du navire pénétrant dans l'intérieur du cercle de virage. Un tel virage est comparable au virage d'un aéroplane muni d'une quille ou de cloisons verticales et qui virerait sans pencher de côté. Bien qu'un tel virage soit possible, ce n'est point ainsi que virent les aéroplanes actuels, même cloisonnés ou à quille, leur virage est peu différent du virage parfait, lequel n'a aucun rapport avec le virage d'un navire. Par exemple, il n'existe aucune analogie entre le virage d'un vapeur et le virage d'un Wright ou d'un Farman.

INFLUENCE D'UNE HÉLICE UNIQUE. — Quand l'appareil, au lieu de deux hélices symétriques, porte une hélice unique, l'effet gyroscopique de cette hélice se fait sentir dans les virages.

Admettons que l'hélice, placée en arrière de G, tourne de gauche à droite autour de la demi-droite GH : d'après la théorie classique de l'effet gyroscopique, pour dévier à droite (ou à gauche) la droite GH, il faudra provoquer à l'aide du gouvernail d'avant une force supplémentaire ascendante quand on vire à gauche, descendante quand on

2 pour la roue d'avant, 1 pour la roue d'arrière]. Mais les liaisons [contacts sans glissement des roues avec le sol] introduisent 6 liaisons, dont 2 holonomes et 4 non holonomes. Le système est donc un système à 7 paramètres liés par 4 liaisons non holonomes. On voit que les deux problèmes (bicyclette et aéroplane), malgré certaines analogies, sont fort différents l'un de l'autre.

vire à droite. Comme l'appareil a déjà tendance à piquer du nez dans les virages [p. 244], il y aura avantage à virer à droite, l'effet gyroscopique atténuera ou annulera l'angle dont il faut braquer le gouvernail d'avant. Si l'hélice tourne de droite à gauche autour de GH, il y aura avantage à virer à gauche.

REMARQUES GÉNÉRALES. — Dans toute cette théorie de l'aéroplane, nous avons supposé l'hélice [ou les hélices] placées à l'arrière et n'influant pas sur les réactions que l'air exerce sur la voilure et l'esquif. Si l'hélice est placée en avant ou si l'appareil est muni d'une queue postérieure à l'hélice participant à la sustentation, le vent de l'hélice accroît derrière celle-ci la vitesse relative de l'air [1]. L'air ayant une vitesse d'arrivée donnée en grandeur et direction par rapport à l'aéroplane, les réactions de l'air sur la voilure et ses annexes sont différentes suivant que l'hélice marche ou est arrêtée. Les conclusions de la page 229 devraient alors être modifiées.

Dans les appareils modernes [ainsi d'ailleurs que dans les navires] on cherche à faire travailler l'hélice dans un fluide non ébranlé. [Le fluide ébranlé est en effet sillonné de remous qui, s'ils sont désordonnés, nuisent au bon fonctionnement de l'hélice]. La discussion de la page 207 s'applique alors et montre que le travail moteur sur l'arbre de l'hélice doit dépasser $\Phi V = V^3 [\lambda\alpha^2 + \mu] = \frac{P^2}{\lambda V} + \mu V^3$; pour V grand, le terme principal μV^3 croîtrait donc comme le cube de V. Mais imaginons qu'on arrive à construire des fuselages tels que le liquide ébranlé derrière eux les accompagne d'un mouvement régulier : l'hélice placée derrière un tel fuselage travaillerait alors dans un liquide sensiblement immobile par rapport à son axe, c'est-à-dire comme au point fixe; la condition $h\omega > V$ de la page 207 ne serait plus nécessaire; le travail moteur de l'hélice pourrait être inférieur [2] à $\Phi V = V^3 [\lambda\alpha^2 + \mu]$.

1. En outre, le tourbillonnement de l'air engendré par l'hélice crée une certaine dissymétrie.

2. On peut également imaginer des explosifs qui réagiraient direc-

La plupart des auteurs s'imaginent que la quantité ΦV est une limite inférieure du travail moteur, imposée par le Principe de la Conservation de l'énergie. C'est une erreur complète. Il n'est pas douteux *a priori* qu'une telle limite existe, ne fût-ce qu'à cause de la viscosité de l'air et des frottements ; mais nous sommes actuellement hors d'état de la déterminer même grossièrement, et elle est vraisemblablement beaucoup plus basse. La limitation que certains théoriciens ont cru pouvoir à l'avance imposer aux vitesses des aéroplanes en admettant comme travail moteur minimum l'expression ΦV est donc sans fondement.

tement sur l'air, en le repoussant en arrière. Ce serait le système de la fusée, mais employé à propulser l'appareil horizontalement. Un tel système a été déjà essayé avec un bon rendement pour propulser des canots automobiles. — Quel que soit le système employé, le but à atteindre c'est que l'appareil avec ses propulseurs ébranle en un temps donné la masse minima d'air, ou plus précisément accroisse l'énergie de l'air d'une quantité minima.



NOTE II

QUELQUES PRINCIPES ÉLÉMENTAIRES DE MÉCANIQUE[1]

La force ; le travail ; la puissance.

Il n'est pas inutile, notamment pour la compréhension des théories relatives au vol des oiseaux de rappeler quelques définitions très simples mais trop souvent oubliées.

Proposons-nous d'élever des matériaux, tels que des pierres de taille, à une certaine hauteur. La première notion pratique qui se présente à nous est celle du *travail total ;* car c'est à la mesure de ce travail que sera proportionné *le prix à payer*, c'est-à-dire l'élément pratique essentiel de la question. Ce prix double évidemment si, la hauteur restant la même, le poids des matériaux à élever devient double ; il triple, si, le poids des matériaux restant le même, la hauteur devient triple, car l'opération qui consiste à élever 100 kilogrammes à une hauteur de 30 mètres peut être subdivisée en trois opérations successives, dont chacune a pour effet d'élever ces 100 kilogrammes à 10 mètres de hauteur. En résumé, le travail est proportionnel à la fois au poids des matériaux qu'on élève et à la hauteur à laquelle on les élève ; il est d'usage d'évaluer numériquement ce travail par le produit du nombre de kilogrammes à élever par le nombre de mètres auxquels on doit les élever : ce produit donne par définition l'expression du travail en *kilogrammètres*. Ainsi, l'élévation de 100 kilo-

1. Cette note élémentaire ne s'adresse pas, bien entendu, aux lecteurs de la note I.

grammes à 30 mètres de hauteur correspond à un travail de 30 × 100 = 3.000 kilogrammètres.

Dans cette évaluation du travail en kilogrammètres, l'expression finale ne conserve pas la trace des valeurs respectives des deux facteurs dont elle est le produit ; un travail de 3.000 kilogrammètres correspond également à l'élévation de 10 kilogrammes à 300 mètres de hauteur, ou de 1.000 kilogrammes à 3 mètres, ou de 100.000 kilogrammes à 3 centimètres. Au point de vue de l'exécution pratique, de telles opérations présentent cependant des difficultés très inégales ; un homme arrivera aisément, en quelques minutes, à transporter plusieurs kilogrammes (sans parler de son propre poids) au sommet de la Tour Eiffel : le même homme serait fort en peine d'élever par ses seuls moyens la masse entière de la Tour, ne serait-ce que d'une faible fraction de millimètre : il n'en a pas la *force*, dira-t-on. Cette notion de force doit donc être envisagée immédiatement après la notion de travail, mais il ne faut pas oublier que le but des machines est précisément de permettre d'effectuer avec une force relativement peu considérable un travail quelconque, même dans le cas où la nature de ce travail semblait exiger une plus grande force. C'est ainsi qu'au moyen d'un cric un seul ouvrier pourra soulever des blocs de pierre d'un poids extrêmement considérable. Lorsque l'on étudie le vol des oiseaux ou de certains appareils mécaniques, on ne doit pas oublier que la force qu'ils peuvent mettre en action a toujours un maximum déterminé par la nature de l'animal ou de l'appareil, et que l'on doit exclure, comme en dehors des données même du problème, la possibilité d'augmenter ce maximum par un dispositif mécanique; il s'agirait alors en effet *d'un autre* animal ou *d'un autre* appareil. Si l'on se place à ce point de vue, on constatera que l'exécution d'un travail déterminé, même très faible, est impossible dans certaines conditions, parce que la force à mettre en œuvre serait trop considérable. C'est ainsi qu'une hirondelle n'arrivera jamais par ses seuls moyens à élever d'un centimètre un poids massif de 100 kilogrammes, ce qui correspond à un travail de 1 kilogrammètre, alors qu'elle effectuera aisément le travail équivalent : élever 10 grammes à 100 mètres de hauteur.

Il est enfin une troisième notion, qui se rattache intimement aux deux précédentes, mais en est cependant distincte : c'est la notion de *puissance*, dans laquelle intervient *le temps*, qui ne jouait aucun rôle dans les définitions du travail et de la force. Tel homme, tel animal, telle machine est capable, pourvu que les conditions du travail n'exigent pas une force excessive [1], d'effectuer un travail régulier, d'un certain nombre de kilogrammètres *par seconde*. C'est ce nombre de *kilogrammètres-seconde* qui est la puissance ; on l'exprime ordinairement en multiples du *cheval-vapeur*, qui correspond à 75 *kilogrammètres par seconde*.

Lorsqu'il s'agira d'une machine, la force déployée étant sensiblement constante, c'est toujours la puissance que l'on évaluera ; d'ailleurs, la notion vulgaire et mal précisée de la *force* d'un homme correspond plutôt à la puissance qu'il peut déployer avec quelque continuité [2], c'est-à-dire au travail qu'il peut effectuer en une heure, par exemple.

Ces définitions étant bien posées, on peut se demander quel travail et par suite quelle puissance sont nécessaires pour soutenir en l'air un poids déterminé. La réponse théorique à cette question a une apparence paradoxale qu'il sera nécessaire d'expliquer un peu : *du moment que le corps ne doit pas être élevé, mais rester simplement à la même hauteur, le travail nécessaire est nul.* Et effectivement, si l'on place un poids au sommet d'une montagne, aucun effort ne sera nécessaire pour l'y maintenir pendant des siècles. Mais, dira-t-on, ce n'est pas ainsi que se pose le problème du vol des oiseaux, et il est bien visible que

1. La puissance varie aussi parfois lorsque la force à déployer est trop faible : si l'on propose à un homme d'élever des poids à une certaine hauteur, et que l'on évalue son travail, le rendement sera très faible si les poids sont trop légers : il n'arrivera pas à élever un poids d'un gramme à une hauteur mille fois plus grande que celle à laquelle il élève pendant le même temps un poids de un kilogramme.

2. C'est seulement dans le cas de certains efforts considérables et momentanés qu'il peut y avoir intérêt à distinguer la force maximum déployée pendant un temps très court par un athlète, par exemple de sa puissance telle qu'elle serait mesurée pendant un temps notable.

ceux-ci déploient des efforts pour se maintenir en l'air à une hauteur constante, même sans s'élever. Sans doute, et c'est pourquoi la réponse faite a une allure paradoxale qui mérite quelque explication.

Pour raisonner tout d'abord sur des phénomènes qui nous sont plus familiers, représentons-nous un homme debout sur un escalier mobile, sorte de tapis roulant sans fin, formant un double plan incliné. Si cet homme n'agit pas, il est clair que son poids aura pour effet de le faire descendre, le tapis roulant étant entraîné sous ses pieds; s'il veut rester à une hauteur constante, il devra à chaque instant regagner par son propre effort le terrain qu'il perd du fait de l'action de la pesanteur: quel sera son travail dans ces conditions ? Il est aisé de se rendre compte que ce travail n'est pas déterminé d'une manière précise par nos données; il dépend essentiellement de la fréquence des mouvements avec lesquels l'homme regagnera le terrain perdu. Si nous supposons l'inclinaison du plan telle qu'il s'abaisse d'un mètre par seconde et si son poids est de 75 kilogrammes, il est clair que s'il fait un bond chaque seconde (bond que nous supposerons instantané, c'est-à-dire d'une durée négligeable par rapport à la seconde), le travail de chaque bond sera de 75 kilogrammètres (puisque 75 kilogrammes auront dû être élevés à un mètre de hauteur) et par suite la puissance nécessaire pour produire ce travail sera d'un cheval-vapeur.

Supposons maintenant que l'homme fasse un saut chaque dixième de seconde; comme, pendant ce temps, il ne sera descendu que de la *centième* partie d'un mètre[1], c'est-à-dire d'un centimètre, le travail correspondant à ce saut sera la centième partie de 75 kilogrammètres, et le travail par seconde la dixième partie, ce qui correspond à un dixième de cheval-vapeur. On voit que l'homme aurait avantage à faire un saut d'un centimètre chaque dixième de seconde, si toutefois son organisme lui permettait de réaliser facilement des mouvements à la fois de très grande fréquence et de très faible amplitude.

1. Car les espaces parcourus par les corps qui tombent en chute libre ou sur un plan incliné sont proportionnels aux *carrés* des temps.

La question de la sustentation en l'air ne se pose pas de la même manière, car la seule force qui ait été jusqu'ici utilisée (si on laisse de côté l'emploi des gaz plus légers que l'air) est la résistance de l'air et il faut tenir compte des lois de cette résistance en fonction de la vitesse. C'est à cause de la forme particulière de ces lois que nous avons pu trouver (p. 49) un minimum de la puissance nécessaire *en fonction de la surface sustentatrice et du poids à sustenter*. Mais il faut bien se rendre compte que ce minimum n'a pas une valeur absolue : il est déterminé par les dimensions de l'appareil considéré et par les conditions de son fonctionnement, et non pas seulement par le poids à sustenter; on peut concevoir, au moins théoriquement (par l'augmentation des surfaces portantes) que l'on diminue indéfiniment le travail nécessaire pour maintenir en l'air un poids donné. C'est ainsi que des gouttelettes d'eau très petites, et par suite de surface très grande par rapport à leur poids (nuages) peuvent être maintenues à une hauteur constante au prix d'un travail très faible par rapport à leur poids total. En d'autres termes, il n'existe pas de limitation théorique du travail nécessaire pour la sustentation, analogue au minimum que le principe de la conservation de l'énergie impose à l'évaluation du travail nécessaire pour élever un poids donné à une altitude donnée.

L'homothétie en mécanique.

La notion de figures semblables, dont l'étude approfondie constitue un chapitre de la géométrie élémentaire, est une des notions qui sont le plus familières à tous, même à ceux qui ne sauraient la traduire dans le langage précis des mathématiciens. Chacun, en voyant un dessin et sa photographie, ou une statue et sa réduction, dira : c'est le *même* dessin ou la *même* statue, mais à une échelle différente. Lorsqu'on parle ainsi, on porte son attention sur *la forme* indépendamment de la grandeur ; c'est cette notion de l'indépendance de la forme et de la grandeur qui est l'origine de l'idée de similitude : deux figures sont dites semblables lorsqu'elles ont même forme, leurs grandeurs

seules différant. La similitude ainsi définie est la similitude géométrique ; lorsque l'on considère un système mécanique, c'est-à dire que l'on tient compte des masses, des forces, des vitesses, la notion de similitude ou d'homothétie[1] devient plus complexe ; en même temps, la perception que nous avons des phénomènes mécaniques est moins directe que notre intuition des figures purement géométriques ; aussi une étude approfondie est-elle nécessaire pour éviter les erreurs auxquelles risquerait de conduire une vue superficielle.

Ce que nous sentons confusément, c'est qu'il serait possible de construire le monde tout entier à une échelle différente sans altérer son fonctionnement ; les phénomènes mécaniques resteraient les mêmes, les temps étant réduits dans un certain rapport constant; mais le spectateur, réduit lui-même, ne s'apercevrait pas du changement. Ce principe de relativité est parfaitement exact en théorie, mais il est sans application pratique, par suite de l'impossibilité où nous sommes d'appliquer effectivement à l'univers entier cette réduction d'échelle ; nous sommes arrêtés à la fois du côté de l'infiniment grand et du côté de l'infiniment petit : les dimensions du globe terrestre d'une part, les dimensions des molécules d'autre part sont des constantes sur lesquelles nous n'avons aucun moyen d'action ; il en résulte, par exemple, que l'accélération due à la pesanteur ne peut pas être modifiée et que, par suite, la réduction d'échelle (ou transformation homothétique) ne pourra pas être appliquée à tout phénomène dans lequel la pesanteur jouera un rôle. D'autre part, les dimensions des molécules interviennent dans les phénomènes de frottement, qu'il s'agisse de solides ou de fluides ; elles interviennent aussi, ainsi que les vitesses, dans la valeur des tensions de vapeurs, etc. ; on ne devra donc pas s'étonner s'il n'est pas possible de réaliser avec exactitude un modèle réduit d'une machine donnée, fonctionnant dans des conditions exactement homothétiques.

Ces remarques sont surtout négatives, c'est-à-dire ne

1. On dit que deux figures semblables sont homothétiques lorsqu'elles sont orientées de la même manière, c'est-à-dire lorsque les lignes homologues sont parallèles.

donnent pas de moyen pratique d'étudier l'homothétie en mécanique ; elles font simplement comprendre pour quelles raisons cette étude exige des précisions que ne saurait donner la simple intuition. Nous n entrerons pas dans les détails, pour lesquels nous renverrons aux traités classiques [1] ; indiquons seulement que les grandeurs définies en mécanique sont mesurées au moyen d'unités, dérivées elles-mêmes de trois unités fondamentales, qui sont le plus souvent ou les unités de longueur de masse et de temps (système C. G. S. ou centimètre, *gramme masse*, seconde), ou celles de longueur, de force et de temps (par exemple mètre, *kilogramme poids*, seconde). Pour que deux systèmes soient mécaniquement semblables, il faut et il suffit que toutes les grandeurs mécaniques mesurables (longueurs, vitesses, accélérations, forces vives, etc.) soient mesurées par les mêmes nombres lorsque l'on choisit pour chacun des deux systèmes des unités convenables. Il y a donc trois rapports de similitude, correspondant aux unités fondamentales, longueur, masse et temps ; les rapports de similitude des unités dérivées sont déterminés par leurs *dimensions* en fonctions des unités fondamentales ; par exemple, si les longueurs sont multipliées par 10 et les temps multipliés par 2, il est évident que les vitesses sont multipliées par 5, puisqu'une longueur dix fois plus grande est parcourue en un temps double.

La réalisation d'un modèle mécanique homothétique à un système donné présente des difficultés parfois insurmontables, car, une fois choisis les trois rapports fondamentaux de similitude, il faut satisfaire à de multiples conditions, tous les éléments du modèle à construire étant alors déterminés (densité des matériaux, frottements divers, tension des vapeurs utilisées, etc.). De plus, en supposant même ces conditions réalisées, les deux systèmes homothétiques au point de vue de la mécanique rationnelle ne le seront généralement pas lorsque l'on tiendra compte de la résistance des matériaux, car les efforts de rupture exercés sur les organes de la machine par son fonctionnement ne varie-

1. Voir Paul Appell, *Traité de mécanique rationnelle*, t. II, 2e édition, p. 532 (Gauthier Villars).

ront pas dans le même rapport que la solidité de ces organes. On serait conduit à construire le grand appareil avec des matériaux plus rigides.

Pour donner un exemple concret de la forme sous laquelle se posent les problèmes d'homothétie mécanique, supposons que l'on veuille étudier sur un modèle réduit, la résistance que l'eau opposera au mouvement d'un navire. Si l'on fait l'expérience dans un bassin d'eau douce, il y aurait lieu tout d'abord de tenir compte de la différence de densité de l'eau de mer ; nous négligerons ce point. Supposons que le modèle soit 10 fois plus petit en dimension linéaire ; les surfaces seront 100 fois plus petites et, si l'on fait avancer le modèle, dans un temps donné, de la même fraction de sa propre longueur que le navire à étudier, les vitesses seront aussi 10 fois plus petites : si l'on admet que la résistance soit proportionnelle à la fois à la surface et au carré de la vitesse, on voit que la résistance à l'avancement sera 10.000 fois plus petite : elle est divisée par la quatrième puissance du rapport d'homothétie. En réalité, le phénomène est plus complexe et une analyse détaillée est nécessaire. On sait que si une carène se déplaçait dans un fluide parfait sans frottement, la résistance serait nulle une fois le régime établi ; la force vive communiquée à chaque instant au liquide par l'avant serait récupérée par l'action du liquide mis en mouvement sur l'arrière. En réalité, il n'en est pas ainsi et il subsiste après le passage du navire, des mouvements du liquide qui absorbent une certaine force vive ; si l'on admet que ces mouvements d'ensemble soient homothétiques pour le modèle, le travail correspondant sera proportionnel à la force vive d'une petite masse liquide, c'est-à-dire au produit de la masse (réduite proportionnellement au cube du rapport d'homothétie linéaire) par le carré de sa vitesse (vitesse réduite proportionnellement à ce rapport), c'est-à-dire que le travail sera réduit proportionnellement à la cinquième puissance du rapport d'homothétie ; comme le déplacement est réduit dans ce rapport simple, la force de résistance correspondant à ce travail est bien proportionnelle à la quatrième puissance de ce rapport, comme nous l'avions déjà trouvé. Mais nous n'avons tenu compte que des mouvements d'ensemble, que l'on

peut regarder comme homothétiques, parce que leur amplitude est extrêmement grande par rapport aux dimensions des molécules. Il se produit, en outre, par le frottement de la paroi de la carène sur le liquide, des mouvements beaucoup moins apparents, rapidement éteints par le frottement du liquide sur lui-même (qui ont, en fin de compte, pour résultat l'échauffement du liquide). L'expérience montre que la force vive absorbée par ces mouvements est relativement moins grande pour une longue paroi. La conséquence est que la portion de la résistance due à ces mouvements n'est pas réduite proportionnellement à la quatrième puissance de la vitesse, mais proportionnellement à une puissance moins élevée. Indiquons par exemple, que dans les modèles au quarantième utilisés pour les essais de la marine française, un procédé de calcul assez complexe, dans le détail duquel nous n'entrerons pas, conduit à distinguer dans la résistance deux portions, l'une proportionnelle à la quatrième puissance du rapport d'homothétie, l'autre suivant une loi plus compliquée, qui équivaut, pour le rapport d'homothétie adopté, à la puissance trois et demi environ (au lieu de quatre) de ce rapport.

On pressent par cet exemple quelles difficultés expérimentales et théoriques sont soulevées par les études de la résistance de l'air sur les carènes et les voilures aériennes et par le fonctionnement des hélices. Aussi est-il désirable que des essais puissent être faits sur de grands modèles, le modèle réduit ne pouvant être utilisé qu'après de nombreuses comparaisons avec le grand modèle permettant de préciser les conditions dans lesquelles sont applicables les lois de l'homothétie. Il faut espérer que nous aurons, d'ici quelques années, des résultats précis sur ces questions, grâce à l'impulsion que le développement de l'aviation va donner aux recherches d'aérotechnique[1].

1. On sait que, grâce à la libéralité de M. Deutsch (de la Meurthe), l'Université de Paris va posséder un Institut aérotechnique, situé près du champ de manœuvres de Saint-Cyr ; il comprend notamment une piste de 1.300 mètres de long sur 25 mètres de large, sur laquelle une voie électrique permettra la circulation de véhicules portant des voilures ou des hélices ; un tel dispositif permettra d'exécuter des recherches jusqu'ici à peu près irréalisables.

TABLE DES MATIÈRES

Préface 1

Introduction : Historique de l'aviation 1

La période légendaire 1

La période héroïque 6

La période scientifique 8

La période industrielle 14

Chapitre I. — Le vol des oiseaux 21

Description du vol 21

Vol orthoptère 21

Vol ornithoptère 22

Vol plané 23

Vol ramé 24

Vol à la voile 24

Explication du vol 25

Remarques générales 25

Le vol en air calme 28

La descente planée 28

Vol orthoptère vertical 31

Vol ramé 33

Le vol par un vent régulier 34

Le vol par un vent ascendant régulier 37

Le vol par un vent irrégulier 40

L'utilisation des pulsations périodiques 43

Chapitre II. — Les orthoptères et les hélicoptères 46

Le principe de l'orthoptère 46

L'ornithoptère 51

Les hélicoptères 53

Les hélices aériennes 53

Application à l'hélicoptère 60
Avantages et inconvénients de l'hélicoptère 62

CHAPITRE III. — LES AÉROPLANES SANS MOTEUR : CERFS-VOLANTS ET PLANEURS 65

Cerfs-volants 65
Historique 65
Description théorique 66
Cerfs-volants actuels 69

Planeurs 72
Manœuvre du gouvernail de profondeur 75
Manœuvre du gouvernail de direction 79

CHAPITRE IV. — L'AÉROPLANE 85

Généralités 85

Description des principaux types 90
Le biplan Voisin 90
Le biplan Wright 97
Le monoplan Blériot 102
Le monoplan Antoinette 104

Les caractéristiques des appareils engagés à Reims en 1909 107

CHAPITRE V. — LA MANŒUVRE DE L'AÉROPLANE 112

La stabilité 112
Stabilité latérale 113
Stabilité longitudinale 117
Stabilité de gyration 120

Les virages 123
Le vol en trajectoire circulaire 123
Le début et la fin d'un virage 129

Le rôle du pilote 132

CHAPITRE VI. — LE RÔLE DE L'ANGLE D'ATTAQUE 134

La loi du sinus 134
La loi du sinus et la loi du sinus carré 134
Application au vol des oiseaux 139

Application à l'aéroplane 146

CHAPITRE VII. — L'AVENIR DE L'AÉROPLANE 153

Les desiderata actuels 153
La stabilité et la gouverne 153

La vitesse et la durée 158
La sécurité 161
Monoplans et biplans 163
L'utilisation pratique 169
L'utilisation militaire 175

NOTE I. — THÉORIE DE L'AÉROPLANE 179
Remarques sur les moteurs à explosion 179
Application à l'automobile 181
Les lois de la résistance de l'air 184
Résistance d'un liquide incompressible ; principe de la relativité 184
Résistance d'un liquide à un plan mince 185
La loi du sin et la loi du sin² 186
Lois empiriques de la résistance de l'air 187
Premier cas : V est normal au plan π 187
Résistance de l'air à un plan incliné 190
Plan rectangulaire oblique 191
Plan animé d'un mouvement quelconque 193
Résistance à un corps quelconque 194
Les frottements de l'air 197
Résistance à une paroi courbe 199
Formules empiriques. Angle d'attaque 200
Courbe métacentrique 202
Résistance à la translation oblique d'une surface cylindrique 204
Propulseurs hélicoïdaux 204
Schéma d'un propulseur 204
Propulseurs hélicoïdaux 206
Application à l'hélicoptère 208
Hélice de pas variable 209
Application à l'aéroplane 210
Lois du planement 210
Problème de la chute planée 210
Discussion 212
Stabilité contre le tangage 213
Conditions générales du planement 214
Mouvements peu différents d'une descente correcte . . 216
Etude précise de la stabilité longitudinale 217
Equilibre de l'aéroplane 218
Schéma de l'aéroplane 218
Gouverne 219

